



**PRAKTIJKONDERZOEK
PLANT & OMGEVING**

Integratie van gewasontwikkeling in kasklimaatregeling bij vruchtgroenten

Temperatuurintegratie met grenswaarden op basis van gewaskundige criteria

Fokke Buwalda
Peter Haghuis
Jan Kempen
Henny van Gurp
Patrick Bouten
Rob Baas

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.
Sector Glastuinbouw
maart 2003

PPO

© 2003 Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V. is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

PPO Publicatienr.; € ...,...

Dit is een vertrouwelijk document, uitsluitend bedoeld voor intern gebruik binnen PPO dan wel met toestemming door derden. Niets uit dit document mag worden gebruikt, vermenigvuldigd of verspreid voor extern gebruik.

Dit onderzoek is mogelijk gemaakt door:
Ministerie van landbouw, natuurbeheer en visserij
Productschap Tuinbouw
NOVEM

Projectnummer: 425073

Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V.

Sector Glastuinbouw

Adres : Bornsesteeg 47, Wageningen
: Postbus 167, 6700 AD Wageningen
Tel. : 0317 - 47 83 00
Fax : 0317 - 47 83 01
E-mail : info@ppo.dlo.nl
Internet : www.ppo.dlo.nl

Voorwoord

Voor u ligt het eindverslag van een bijzonder project, 'Integratie van gewasontwikkeling in kasklimaatregeling bij vruchtgroenten', PPO project 425073. Het was een bijzonder project, vooral vanwege het verkennend karakter, de relatief fundamentele aanpak en de lange termijn doelstelling. Het project vloeide voort uit een aanzienlijke reeks onderzoeksprojecten aan temperatuurintegratie, in het kader waarvan op proefondervindelijke wijze is omgegaan met de ligging van de kritische grenswaarden, waarbinnen temperatuurintegratie veilig mogelijk is. Evaluatie van de resultaten van dit onderzoek heeft geleid tot het inzicht dat de ligging van deze grenswaarden variabel is en dat een empirische benadering in principe ongeschikt is om tot een bevredigend antwoord te komen op de vraag naar de ligging van deze grenzen. Daarnaast is gebleken dat, hoewel de praktijk inmiddels overtuigd is van de mogelijkheden voor energiebesparing door toepassing van temperatuurintegratie, de onzekerheid over deze grenzen de daadwerkelijke toepassing van het principe belemmerde.

Oogst van dit project is een schat aan ervaring en een serie inzichten, die van doorslaggevende betekenis zullen blijken voor de verdere ontwikkeling van toepassingen van het principe van temperatuurintegratie, en daardoor voor de verdere verbetering van de energie-efficiëntie van het productieproces in de glastuinbouw. De opdrachtgevers NOVEM, Productschap Tuinbouw en het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij worden bedankt voor hun visie en lef om te durven investeren in een dergelijk ambitieus project in een tijd waarin sterk de nadruk lag op onderzoek waarvan op korte termijn direct toepasbare resultaten worden verwacht.

Een complex project als dit komt alleen tot een goed einde dankzij de inzet van velen. In het bijzonder wil ik alle PPO-collega's bedanken die stug door zijn gegaan met goed werk afleveren, ook in de periode dat de goede afloop van het project wat minder zeker was. Dus: Peter, Gitta, Leen, Frans, Jan, Henny, Patrick, Rob, Arie, Nico, Jop, bedankt! Verder wil ik stilstaan bij het essentiële aandeel dat enkele mensen van Hoogendoorn Automatisering en LetsGrow.com hebben geleverd aan het slagen van dit project: Jan, Leon, Arend, Hans, René: bedankt!

Fokke Buwalda

Inhoudsopgave

pagina

1	INLEIDING	7
2	DOELSTELLING	9
3	KARAKTERISERING VAN DE TEMPERATUURRESPONS VAN VERSCHILLENDE KRITISCHE PROCESSEN ONDER EXTREMERE CONDITIES	10
3.1	Inleiding	10
3.1.1	Invloed van temperatuur	10
3.1.2	Plantbalans, zetting en regelmaat.....	11
3.2	Materiaal en methoden.....	11
3.3	Resultaten.....	12
3.4	Discussie	16
4	NADERE ANALYSE VAN PRODUCTIEGEGEVENS UIT DE PRAKTIJK.....	18
4.1	Inleiding	18
4.2	Materiaal en methoden.....	18
4.3	Resultaten.....	19
4.4	Discussie	22
5	TESTEN VAN EEN INTEGREREND REGELALGORITHME OP BASIS VAN HET RRT-PRINCIPE	24
5.1	Inleiding	24
5.2	Materiaal en methoden.....	25
5.3	Resultaten.....	26
5.3.1	Technische realisatie.....	26
5.3.2	Werken met streefwaarden voor de plantbelasting.....	27
5.3.3	Productie	28
5.3.4	Energieverbruik	30
5.4	Discussie	32
6	DIVERSE MODELLEN DIE ZIJN ONTWIKKELD IN DE LOOP VAN, OF ALS VERVOLG OP, DIT PROJECT .	34
6.1	ANMOD.....	34
6.2	RRT, TIGG1 en TIGG2.....	35
6.3	UGD	35
6.4	PepSim1	35
6.5	OscPep.....	35
6.6	PepSim2.....	36
6.7	PepSim3.....	36
6.8	PepSim-GTI	37
7	ALGEMENE DISCUSSIE	38
7.1	Technische resultaten	38
7.2	Energie resultaten.....	39
7.3	Noodzakelijk vervolgonderzoek en overige mogelijkheden.....	40
8	REFERENTIES.....	42

Samenvatting

Doel van het in dit rapport gepresenteerde onderzoek was het vinden van grenswaarden voor temperatuurintegratie op basis van gewaskundige criteria. Temperatuurintegratie is een veelbelovende techniek, waarmee aantoonbaar energiebesparing kan worden bereikt zonder verlies aan productie of kwaliteit. Hoewel er momenteel technisch betrouwbare apparatuur en programmatuur beschikbaar is voor het toepassen van energie-efficiënte klimaatregeling op basis van temperatuurintegratie op bedrijven, blijkt er bij telers over het algemeen weinig animo te bestaan om deze techniek daadwerkelijk te gaan toepassen. Een belangrijke oorzaak is de onzekerheid over de grenswaarden waarbinnen temperatuurintegratie veilig kan worden toegepast, en de hiermee samenhangende associatie met teeltrisico.

Uitgangspunt van het onderzoek was dat de grenswaarden voor temperatuurintegratie inderdaad variabel zijn. Kwantitatief inzicht in de ligging van deze grenzen en de processen die daarop van invloed zijn is nodig om temperatuurintegratie veilig te kunnen toepassen. Dit inzicht is in principe echter breder toepasbaar, en is bruikbaar voor o.a. aanvoervoorspelling, handhaven van productkwaliteit en het in balans houden van het gewas. Zo kan een situatie ontstaan waarin temperatuurintegratie hand in hand kan gaan met een betere beheersing van het teeltproces, waardoor het concept zal kunnen worden geassocieerd met nieuwe kansen in plaats van risico's. Betrouwbare voorspellende informatie op elk van deze gebieden ontbreekt momenteel voor de meeste tuinbouwgewassen.

Als proefgewas werd paprika gekozen. Paprika is een gewas dat een zeer dynamisch productieverloop laat zien. Het is ook een gewas waarbij de onzekerheid bij telers m.b.t. de correcte teeltvoering relatief groot is, en de bereidheid om af te wijken van de gebaande paden navenant klein. In dit opzicht is paprika dus een gewas waarbij veel winst is te behalen.

Als oriënterende stap werden intensieve waarnemingen gedaan aan paprikagewassen geteeld bij een brede reeks temperaturen (15 - 25°C in 6 trappen) en drie stengeldichtheden (5, 7.5 en 10 stengels per m²) in ruime proefkassen. In overeenstemming met de theorie bleek de ontwikkelingssnelheid van het gewas afhankelijk te zijn van het temperatuurniveau. Er bleek echter nauwelijks invloed te zijn van de proeffactoren licht en plantdichtheid op de totale productie (kg/m²). Het effect van de lagere ontwikkelingssnelheid bij lage temperatuur bleek te worden gecompenseerd door extra vruchtzetting. Wel was er een duidelijk optimum wat betreft kwaliteit: rond 19°C werden de vruchten het zwaarst. Zowel bij hogere als bij lagere temperatuurniveaus werden lichtere vruchten geoogst, maar wel in grotere aantallen.

Op basis van een bestaande dataset is de hypothese ontwikkeld dat de verhouding tussen stralingssom en temperatuurniveau (RRT) een maat is voor de draagkracht (belastbaarheid) van het gewas. Een gefitte lijn van waargenomen plantbelasting (aantal vruchten per m²) tegen RRT werd gebruikt als basis voor een integrerende temperatuurregelaar die het gewas in de gewenste balans moest houden. Temperatuurafwijkingen werden berekend en geïntegreerd ten opzichte van de RRT-lijn. Dit stookprogramma is geïnterfaced met de klimaatregelaar in 4 proefkassen om te kunnen worden getoetst. Als referentie werd tevens een bestaande integrerende regelaar in het systeem opgenomen, de Economic NT / Econaut CTI van Hoogendoorn Automatisering. Inderdaad bleek met het systeem 25% energiebesparing te kunnen worden aangetoond zonder verlies aan productie en kwaliteit. Tevens werd duidelijk dat een groot deel van het jaar het stoken omwille van de vochtbeheersing een doorslaggevende invloed heeft op het energieverbruik. Op de warmtevraag ten behoeve van vochtbeheersing bleek echter ook zeer significant te kunnen worden bespaard door toepassing van het stuurmodel of de optimaliserende Hoogendoorn regeling.

Een analyse van de resultaten wees uit dat de relatie tussen RRT en het aantal vruchten per m² toch een te grove maat is voor plantbelasting en plantbalans. Dit betekent dat toch meer kwantitatief inzicht nodig is in het verloop van de zetting, de ontwikkeling van sinksterkte per vrucht gedurende de uitgroeiperiode. Verondersteld werd, op grond van de klassieke temperatuurintegratie uit de akkerbouw, dat de uitgroeiduurtijd van vruchten, uitgedrukt in graaddagen, een constante factor zou zijn. Nadere analyse van

registratiegegevens liet zien dat niet het geval is. Dit inzicht bleek van groot belang te zijn voor de ontwikkeling van een model, gebaseerd op plantbalans, waarmee via Internet uitgroei duur en productie voorspeld zullen gaan worden. Uiteindelijk is de bedoeling om aan deze oogstvoorspeller ook een beslissingsondersteunende functie te koppelen waarmee telers de veilige grenzen voor toepassing van temperatuurintegratie kunnen bepalen. Een interface tussen een dergelijk DSS-systeem en een integrerende klimaatregelaar zou een goede basis vormen voor de integratie van energiebesparing, energimanagement (optimaal gas inkopen op de vrije energiemarkt) en teeltsturing.

1 Inleiding

Recent onderzoek heeft aangetoond dat met temperatuurintegratie een significante besparing op het gasverbruik kan worden bereikt. Met een regelaar die de kasttemperatuur binnen het etmaal integreerde werd 8 - 18% besparing gerealiseerd (Rijsdijk et al., 1998); met een meerdaags integrerend regelalgoritme werd 15 % besparing bereikt (Buwalda et al., 1999a,b). Het principe van temperatuurintegratie is dat, binnen bepaalde grenzen, het teeltresultaat wordt bepaald door de gemiddelde temperatuur en niet door de wijze waarop deze tot stand is gekomen. Voor verschillende vruchtgroentegewassen is de geldigheid van dit principe inderdaad aangetoond (Slack and Hand, 1983; Van der Vlugt, 1983a, b; Hurd and Graves, 1984; Bakker en Van Uffelen, 1988; De Koning, 1988a, b, 1990, Rijsdijk et al., 1998).

Bij het verder ontwikkelen van temperatuurintegratie als mogelijkheid voor energiebesparing in de glastuinbouw moet onderscheid worden gemaakt naar gewasgroep. In de sierteelt worden andere eisen aan het gewas gesteld dan in de vruchtgroententeelt. Bij de teelt van vruchtgroenten is (in tegenstelling tot de sierteelt) de morfologische ontwikkeling van de plant uitsluitend van belang voor zover die invloed heeft op de productie van vruchten. Dit project concentreert zich op vruchtgroentegewassen, waarbij paprika als modelgewas zal dienen.

Het onderzoek op het gebied van temperatuurintegratie heeft zich tot nu toe geconcentreerd op de tolerantie van het gewas voor afwijkingen van de vaste temperatuursetpoints, zoals voorgeschreven door in de praktijk gangbare teeltrecepten. De kritische grenswaarden voor afwijkingen van het temperatuursetpoint zijn hierbij empirisch vastgesteld. Helaas kan in principe aan de resultaten van empirisch onderzoek alleen geen garantie worden ontleend dat de vastgestelde grenswaarden onder alle denkbare omstandigheden geldig zijn. In de praktijk zullen daarom bij toepassing van temperatuurintegratie voorlopig ruime veiligheidsmarges in acht moeten worden genomen. De associatie van het begrip 'veiligheidsmarges' met 'risico' kan echter de acceptatie van temperatuurintegratie door de doelgroep belemmeren.

Impliciet wordt bij deze empirische benadering aangenomen dat conventionele teeltrecepten met vaste temperatuursetpoints tot optimale teeltresultaten zullen leiden. Bij het gewas paprika, dat hier model staat voor de vruchtgroentegewassen, blijkt in de praktijk echter dat zetting, plantbelasting, uitgroeiduur en gemiddeld vruchtgewicht verre van constant zijn, maar juist aan allerlei periodiek of toevallig optredende fluctuaties onderhevig zijn (van den Berg et al., 2001). Deze effecten kunnen periodiek zijn, zoals de bij paprika bekende zettingsgolven, seizoensafhankelijk of optreden na bijv. een weersomslag. Dit wijst erop dat het gewas onder normale omstandigheden helemaal niet voortdurend in een constante, laat staan optimale toestand verkeert.

De kritische grenswaarden voor temperatuurintegratie zijn gedefinieerd als de maximale temperatuurafwijkingen die nog kunnen worden gecompenseerd zonder dat dat leidt tot meetbare effecten op productie of kwaliteit (Buwalda, 1996, 2002). Voor zover de bovengenoemde fluctuaties in zetting, plantbelasting, uitgroeiduur en gemiddeld vruchtgewicht inderdaad zijn toe te schrijven aan verstoringen van het fysiologisch evenwicht (plantbalans), is de implicatie dat met het toepassen van conventionele setpointrecepten de kritische grenswaarden van het gewas al worden overschreden. Ogenscheinlijk is er dus sprake van variatie in de ligging van de kritische grenswaarden voor temperatuurintegratie. De werkelijke reden hiervoor is waarschijnlijk dat de balanstemperatuur van het gewas zelf varieert onder invloed van de plantbelasting en het lichtniveau (Buwalda 2002). Vaste setpoints zijn hierdoor niet geschikt om als referentie te dienen voor temperatuurintegratie. Een belangrijk uitgangspunt van dit project is de veronderstelling dat grenswaarden voor temperatuurintegratie, gedefinieerd ten opzichte van die variabele balanstemperatuur, wel constant zullen blijken te zijn. Met andere woorden: je moet eerst weten waar de balans ligt om de grootte van afwijkingen te kunnen vaststellen.

Vanwege de kwaliteitswisselingen met vaste temperatuursetpoints en tevens om de noodzaak van

veiligheidsmarges te verminderen is het wenselijk om de gewenste teelttemperatuur en de toelaatbare afwijkingen daarvan gewasfysiologisch te onderbouwen. Hierbij kan direct worden aangesloten op de reeds in de praktijk algemeen gangbare begrippen plantbalans en regelmaat, die betrekking hebben op de interactie tussen biomassa-productie en ontwikkelingsprocessen. Deze processen kunnen kwantitatief worden beschreven met behulp van dynamische source/sink-modellen, die voor verschillende vruchtgroentegewassen reeds beschikbaar zijn (De Koning, 1994; Marcelis, 1994; Heuvelink, 1996a,b).

Dit project beoogt het relateren van de gewenste teelttemperatuur aan het lichtniveau in de kas en aan gewaseigenschappen zoals lichtonderschepping en vruchtbelasting, waarbij plantbalans en regelmaat als criteria dienen. Hierdoor ontstaat een meer gefundeerde referentiewaarde op basis waarvan temperatuurafwijkingen kunnen worden gekwantificeerd, en waardoor tevens een toetsbaar inzicht ontstaat in de ligging van kritische grenswaarden op basis van fysiologische informatie. Toepassing van deze benadering zal naar verwachting leiden tot een meer lichtafhankelijke temperatuurregeling. Voor een empirische toepassing van dit type regeling is in het verleden al een energiebesparend effect van 20% vastgesteld (Papenhagen, 1977, Ludolph en Hendriks, 1989).

Wanneer temperatuurintegratie op deze wijze wordt vertaald in termen van afwegingen die telers in de praktijk al dagelijks maken, zal acceptatie van dit principe naar verwachting voorspoediger verlopen dan tot nu toe het geval was. Doordat in deze benadering temperatuurintegratie direct wordt gekoppeld aan het beheersen van de balans in het gewas zal energiebesparing hand in hand kunnen gaan met een vermindering van teeltproblemen, in plaats van de huidige associatie met extra risico en veiligheidsmarges. Tevens komt goed onderbouwde, kwantitatieve informatie beschikbaar op basis waarvan geavanceerde, energiezuinige klimaatregelaars de beschikbare optimaliseringsruimte maximaal kunnen benutten. Concrete, kwantitatieve informatie over integratieruimte en grenswaarden zal het voor de teler eenvoudiger maken om temperatuurintegratie te integreren in de totale bedrijfsvoering en om maximaal gebruik te maken van de mogelijkheden voor energiebesparing die een integrerende klimaatregelaar biedt. Op langere termijn zijn de verbanden, getoetst in dit project, van belang voor de ontwikkeling van de volgende generatie dynamisch optimaliserende klimaatregelaars. Het meest geavanceerde pakket dat draait op de huidige generatie klimaatcomputers is in staat om het energieverbruik per hectare teeltoppervlakte te minimaliseren. Effecten op het gewas worden hierbij dus alleen zijdelings in aanmerking genomen in de vorm van instelbare begrenzingen. Verwacht kan worden dat komende generaties regelaars wel in staat zullen zijn om kwantitatief (stook) kosten tegen (productie- of kwaliteits-) baten af te wegen. Dan zal het mogelijk worden om het energieverbruik per eenheid product te optimaliseren en om een vooraf gesteld teeltdoel op energie-efficiënte wijze te realiseren.

2 Doelstelling

Dit project beoogt het relateren van het concept temperatuurintegratie aan de onder telers van vruchtgroentegewassen gangbare begrippen plantbalans en regelmaat in productie. Op basis van modelmatig en experimenteel onderzoek zal het verband worden gelegd tussen de gewenste teelttemperatuur, de lichtintegraal en de plantbelasting. Op grond van dit verband kan de tolerantie van het gewas voor tijdelijke afwijkingen in de totstandkoming van de licht- en temperatuurintegraal worden gekwantificeerd. Deze tolerantie bepaalt de potentiële energiebesparing en de optimaliseringsruimte, beschikbaar voor geavanceerde energiezuinige klimaatregelaars.

Temperatuurintegratie op basis van de plantbalans zal binnen dit project worden vergeleken met temperatuurintegratie op basis van een vast temperatuursetpoint. Als referentie zal in dit verband dienen het regelprogramma Econaut CTI van Hoogendoorn Automatisering B.V.

3 Karakterisering van de temperatuurrepons van verschillende kritische processen onder extremere condities

3.1 Inleiding

Om op verantwoorde wijze temperatuurintegratie toe te kunnen passen moet eerst de reactie van het betreffende gewas op temperatuur en temperatuurafwijkingen bekend zijn. Voor het gewas paprika leek de beschikbare informatie aanvankelijk zeer beperkt. In ieder geval stond voor de doelgroep, de paprikatelers, wel vast dat het aanhouden van de correcte kastemperatuur zeer nauw luistert, en dat afwijkingen al snel tot catastrofale gevolgen zouden leiden. Om de omvang van deze gevolgen kwantitatief te kunnen inschatten en daarbij de meest gevoelige processen te kunnen identificeren is een proef uitgevoerd met een brede reeks temperatuursetpoints (15 - 25°C) bij verschillende stengeldichtheden.

3.1.1 Invloed van temperatuur

De belangrijkste invloed van temperatuur is op de ontwikkelingssnelheid van het gewas (bladafsplitsing, bloeitempo, uitgroei van bladeren en vruchten); hoe hoger de temperatuur, hoe sneller deze processen verlopen (Maaswinkel et al., 1991; De Koning, 1992). De directe invloed van temperatuur op de groei (fotosynthese, productie van biomassa) is veel geringer; deze processen worden veel sterker bepaald door de factor licht (Marcelis en De Koning, 1995).

Temperatuur kan wel een indirecte invloed hebben op de productie van biomassa: bij een jong gewas zijn de bladeren vaak nog niet ver genoeg uitgegroeid om al het beschikbare licht op te vangen. Versnelde afsplitsing en uitgroei van bladeren bij een hogere temperatuur zorgt dat het gewas meer licht opvangt en meer assimilaten maakt. Deze assimilaten worden meteen weer geïnvesteerd in extra blad zodat er meer licht kan worden opgevangen en een effect van rente - over - rente ontstaat. Dit effect stopt zodra er zoveel blad is dat vrijwel al het beschikbare licht wordt opgevangen, en de aanmaak van extra blad geen extra voordeel meer oplevert. Verschillen die in deze vroege teeltfase ontstaan kunnen de hele teelt doorwerken op de productie (Nilwik 1981).

Het basisprincipe van temperatuurintegratie is dat de gemiddelde temperatuur bepalend is voor de ontwikkeling van het gewas. De manier waarop dit gemiddelde tot stand is gekomen is veel minder belangrijk (De Koning, 1992; Wang, 1960).

Op deze regel is één belangrijke uitzondering: de verdeling van temperatuur over dag en nacht. Planten hebben een dag/nachtrithme; sommige processen vinden alleen overdag plaats, andere vooral 's nachts. Wanneer de dagtemperatuur gedurende een langere periode consequent verschilt van de nachttemperatuur dan kan dit specifieke gevolgen voor het gewas doordat de balans tussen dag- en nachtprocessen wordt beïnvloed. Dit systematische verschil wordt aangeduid met DIF; een positieve DIF betekent dat de dagtemperatuur hoger is dan de nachttemperatuur, bij een negatieve DIF zijn dag- en nachttemperatuur omgekeerd. Het belangrijkste effect van -DIF bij paprika is een verkorting van de internodiën; positieve DIF geeft meer strekking. +DIF kan een gunstig effect op de uitgroei van het blad (LAR) waarbij meer lichtinvang tot een hogere productie leidt; omgekeerd kan een verminderde bladstrekking bij -DIF de vroege productie remmen (Bakker & van Uffelen, 1988). Wanneer dit probleem wordt voorkomen is er over het algemeen geen effect van DIF op de totaalproductie, evenmin als op de ontwikkelingssnelheid (Rijsdijk et al., 1998). Effecten van DIF zijn eigenlijk alleen over langere perioden bestudeerd, over effecten van kortere perioden of een minder regelmatige DIF is niets bekend. In vergelijking met de effecten van -DIF lijken effecten van meerdaagse temperatuurschommelingen relatief klein te zijn.

3.1.2 Plantbalans, zetting en regelmaat

De aanmaak (fotosynthese) en de verwerking van assimilaten (onderhoud van de plant en groei) moeten in principe met elkaar in evenwicht zijn. Op de lange duur kan een plant nooit meer assimilaten opmaken dan er gevormd zijn, en de capaciteit om niet verwerkte assimilaten op te slaan is ook eindig. Het feit dat de plant over tijdelijke opslagcapaciteit beschikt betekent wel dat de afstemming van aanmaak en verwerking van assimilaten op de korte termijn (1-2 dagen) niet erg kritisch is; de verschillen worden gebufferd (Tchamitchian, 1998). De meeste vruchtgroentegewassen (waaronder paprika) zijn in staat om zelf de assimilatenbehoefte af te stemmen op het aanbod. Dit kan doordat een overschot aan assimilaten leidt tot extra vruchtzetting, terwijl een tekort leidt tot een slechte zetting (Marcelis en De Koning, 1995). Uitgroeïende vruchten zijn meestal de belangrijkste afnemers van assimilaten. Een hoge temperatuur stimuleert de uitgroei van vruchten en daarmee de vraag naar assimilaten, waardoor de zetting zal afnemen. Omgekeerd zal een lage temperatuur de zetting stimuleren doordat een vertraagde uitgroei leidt tot een overschot aan assimilaten. Doordat de invloed van de zetting op de totale plantbelasting vrij traag doorwerkt kan een ongewenst cyclisch patroon van hoge en lage plantbelasting ontstaan (De Koning, 1989). Bij paprika kan ook een overschot aan assimilaten tot problemen leiden doordat zogenaamde 'knoopvruchten' ontstaan (Rijdsdijk et al., 1998; Aloni et al., 1999). Het is de taak van de teler om met aanpassingen van de stengeldichtheid, vruchtsnoei en de keuze van het temperatuurniveau het gewas in balans te houden en de productie op regelmaat.

In de literatuur wordt aangegeven dat bloei en vruchtvorming bij paprika in ieder geval goed gaan tussen 10 en 28°C, terwijl kortdurende perioden van hoge temperatuur worden getolereerd (max. 4 uur bij 32°C; Ryski, 1986). Er is sprake van een sterke interactie tussen tolerantie voor hoge temperaturen en het lichtniveau: bij weinig licht neemt de zetting bij hoge temperaturen sterk af. De range van 13 tot 27°C (winter) of 32°C (zomer) lijkt dus fysiologisch veilig voor paprika. Er zijn aanwijzingen dat een hoge nachttemperatuur schadelijker is (i.v.m. bloemabortie) dan een hoge dagtemperatuur; omgekeerd werken lage nachttemperaturen (10°C of lager) bevorderlijk op de bloei (Rylski, 1984). De vitaliteit van het stuifmeel neemt af bij temperaturen lager dan 15°C en hoger dan 30°C (Cochran, 1942), maar het is niet duidelijk in hoeverre de pollenkieming doorwerkt in de totale vruchtproductie.

Het is de bedoeling om inzicht te krijgen in de dynamiek van groei en drogestofverdeling van paprika, in relatie tot de klimaatfactoren licht, temperatuur en CO₂. Hiervoor werd in deze proef kwantitatieve informatie verzameld m.b.t. het verloop van de bepalende klimaatfactoren en de belangrijkste deelprocessen van groei en ontwikkeling. Dit inzicht is nodig om de tolerantie van het gewas voor temperatuurafwijkingen te bepalen op basis van gewaskundige criteria. Het is de bedoeling om een op basis van dit inzicht een model te ontwikkelen dat ook buiten de in de praktijk gangbare instellingen voorspellende waarde bezit. Daarom is gekozen voor brede reeksen voor de factoren licht (d.m.v. 3 niveaus plantdichtheid) en temperatuur (d.m.v. 6 niveaus stook- en luchttingsinstellingen). De temperatuurcontrasten worden aangelegd vanaf de eerste zetting, wanneer ook wordt gestart met het doen van metingen en registraties. De motivatie voor deze beperking was dat de proef te ingewikkeld zou worden als planten bij de eerste zetting al sterk zouden verschillen als gevolg van een verschillende voorbehandeling. Aangenomen werd dat het effect van plantdichtheid voor de eerste zetting nog verwaarloosbaar was, gezien de lage bladbedekkingsgraad.

3.2 Materiaal en methoden

Metingen: Continu geregistreerd: omgevingsparameters temperatuur, licht, CO₂, RV;

2 x per week : zetting, vruchtsnoei, labelen voor uitgroeïduur, uitbreken zij scheuten,

oogstgewicht; van al het snoeiafval (zijscheuten, bladeren, vruchtsnoei, etc.) en van de geoogste vruchten wordt altijd het aantal en versgewicht bepaald;

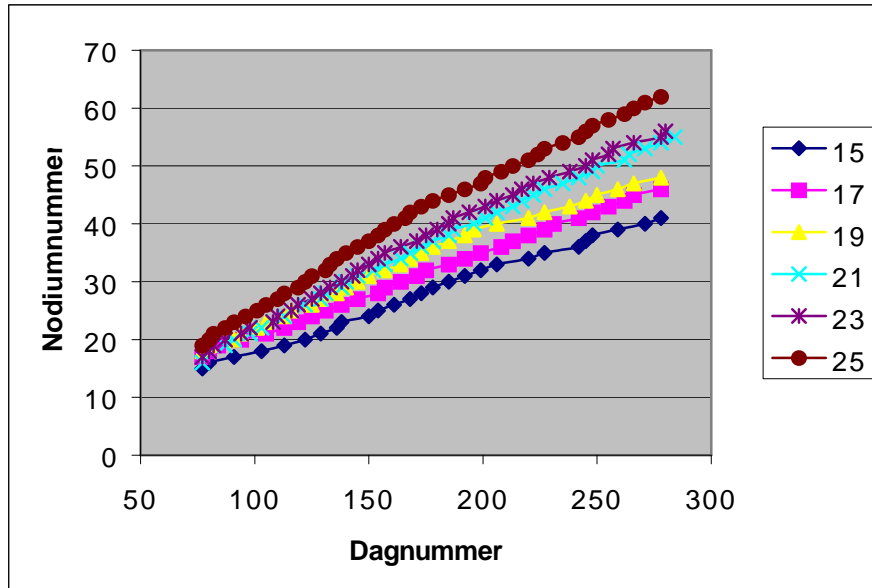
Maandelijks: drogestofgehalte van al het snoeiafval en van een steekproef van de geoogste vruchten. In de steekproef van de geoogste vruchten de kwaliteit: lengte/dikte, dikte pericarp, vruchtopbouw, zaadlijsten, afwijkingen, etc.

Eens per 2 maanden: planten slopen voor bladoppervlakte, vers/drooggewicht van alle onderdelen, tellingen van aantal bladeren, knopen, vruchten.

Factoren:

- * 6 kassen in 2 blokken van 3
- * 2 rassen: Spirit (zet gemakkelijk) en Carthago (vegetatief)
- * temperatuurreeks 15 – 17 – 19 – 21 – 23 – 25 etmaaltemp, dus met een bandbreedte van 10 rond de gangbare praktijk. Verschil dag/nacht +1°C; lichtverhoging 0, 1, 2, 3, 4, 5 °C per 1000 W m²
- P-band luchting kort bij lage temperatuur, langer bij hoge temperatuur; deze instellingen worden gedaan om te zorgen dat de behandelingencontrasten 's zomers zo veel mogelijk in stand blijven.
- * stengeldichtheden: 2 stengels per plant; 2, 3 of 4 planten per broodje;
- 18 steenwolbroodjes per meter.

3.3 Resultaten

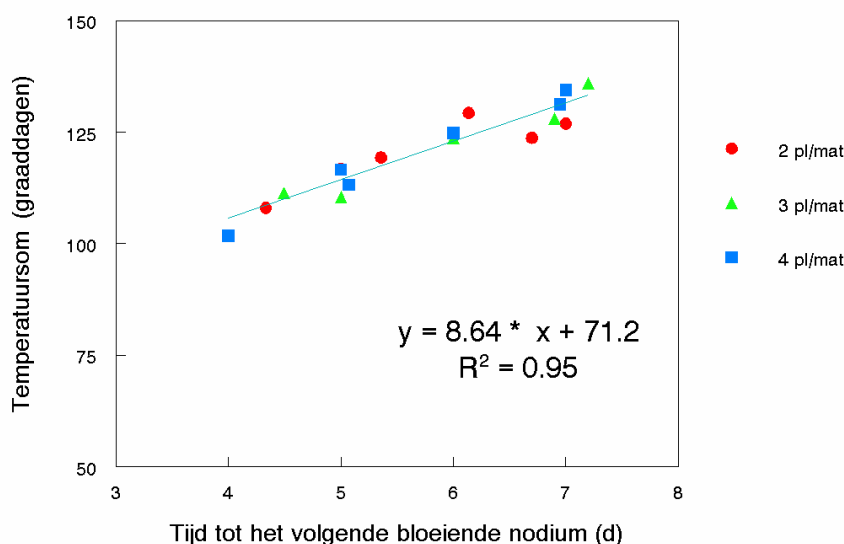


Figuur 3.1 - Ontwikkeling van het aantal afgesplitste nodia van paprika 'Spirit' in het teeltseizoen bij verschillende temperatuursetpoints.

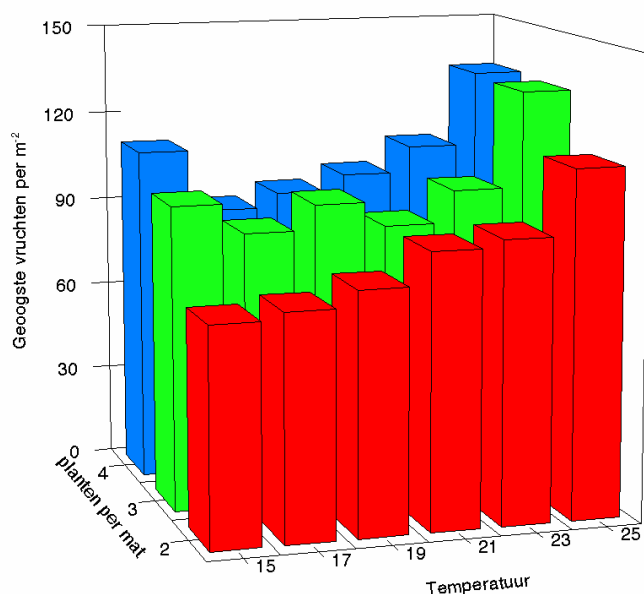
De invloed van de factor temperatuur op de ontwikkelingssnelheid was duidelijk te zien in deze proef, waarin de effecten van 6 verschillende temperatuursetpoints op groei en ontwikkeling van paprika werden bestudeerd (figuur 3.1). Ondanks dat de gemiddelde gerealiseerde temperaturen wat minder ver uit elkaar lagen dan de ingestelde waarden (met name 15°C is midden in de zomer niet te realiseren) was er een systematisch effect te zien op de snelheid waarmee het gewas nieuwe nodia afsplitste. De temperatuurcontrasten waren al enkele weken ingesteld, zodat er op de eerste dag van waarneming al verschillen in aantal afgesplitste nodia te zien waren. Het geleidelijk groter worden van de verschillen wordt veroorzaakt door verschillen in afsplitsingssnelheid.

In figuur 3.2 is te zien dat de ontwikkelingssnelheid van de top zich duidelijk volgens bepaalde

wetmatigheden gedraagt wanneer deze wordt uitgedrukt in graaddagen.

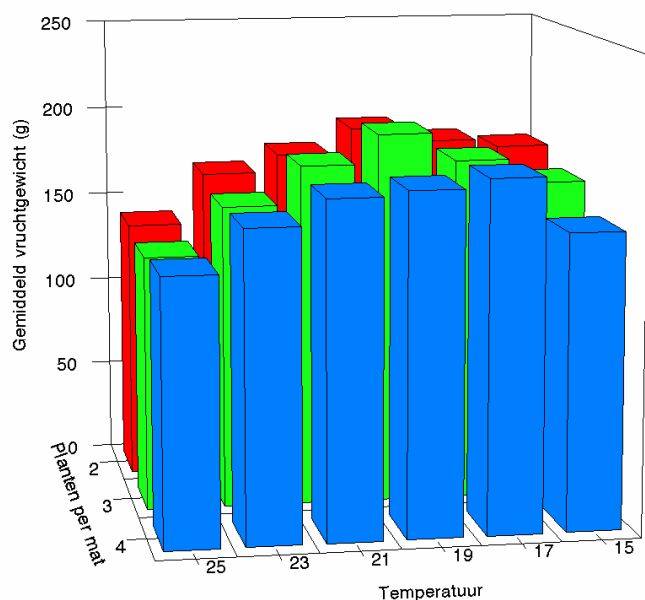


Figuur 3.2 - Bloeisnelheid van paprika cv. 'Spirit' bij verschillende temperaturen en plantdichtheden. Uitgezet is het aantal graaddagen tussen het begin van de bloei van een bepaald nodium en het moment waarop het volgende nodium begint te bloeien tegen de tijdsduur van deze periode (dagen). De regressievergelijking geldt voor de drie plantdichtheden in combinatie.



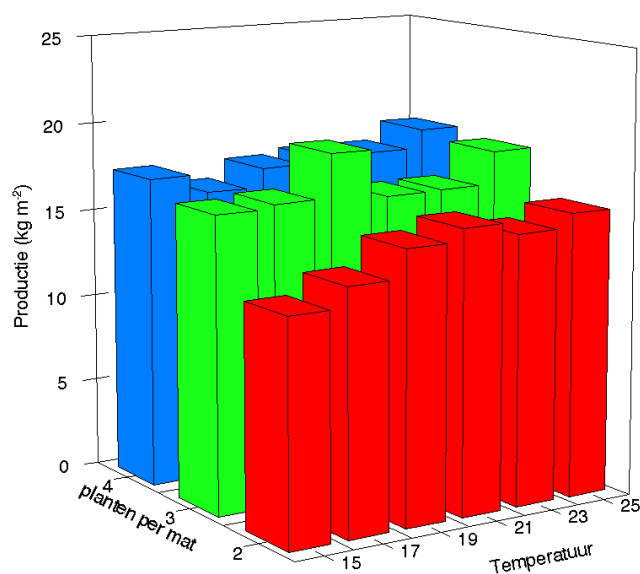
Figuur 3.3 - Aantal geoogste vruchten per m² gedurende de proefperiode in relatie tot het temperatuursetpoint (°C) en de plantdichtheid (aantal planten per steenwolmat).

Het effect van temperatuur op de snelheid van ontwikkeling bleek geen duidelijke relatie te hebben met het aantal geoogste vruchten (fig. 3.3). Bij de laagste plantdichtheid was er wel sprake van een parallele trend, maar bij de hogere plantdichtheden is dit zeker niet het geval; hier werden bij 15°C juist meer vruchten geoogst dan bij temperaturen van 17 - 23°C. Behandelingseffecten op het gewicht van de vruchten bleken een tegenovergestelde trend te vertonen (fig. 3.4); bij 19°C werden de zwaarste vruchten geplukt. Voor de plantdichtheden 3 en 4 planten per mat geldt dat de behandelingseffecten op aantal vruchten en gemiddeld vruchtgewicht elkaar compenseerden, zodat de totale productie geen relatie vertoonde met plantdichtheid en temperatuur (figuur 3.5). Alleen bij de laagste plantdichtheid bleef de productie achter.



Figuur 3.4 - Effecten van temperatuursetpoint (°C) en plantdichtheid (planten per mat) op het gemiddeld versgewicht van de vruchten (g).

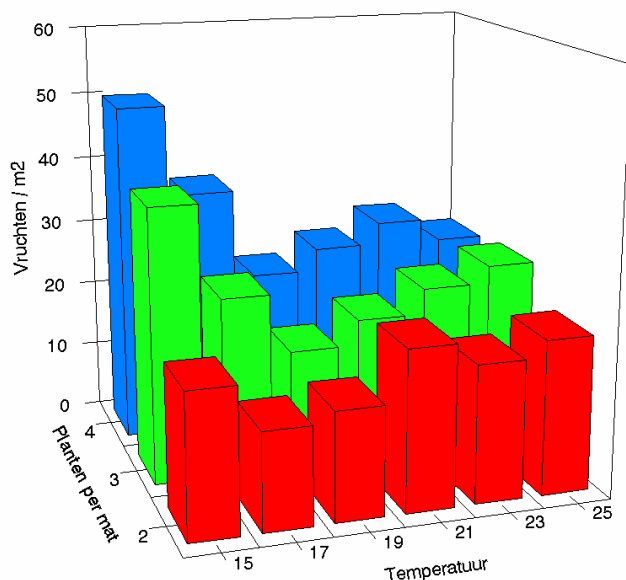
Dit effect was groter naarmate de temperatuur lager was. Dit effect is vrij bekend in de productie-ecologie. De verklaring is dat er bij een lage plantdichtheid aanvankelijk veel licht verloren gaat doordat er te weinig blad is om alles te kunnen absorberen. De totale hoeveelheid licht die er over de hele teeltperiode wordt opgevangen is dan structureel lager, en daar staat bij een gegeven lichtproductiviteit (opbrengst per hoeveelheid geabsorbeerd licht) een lagere totaalproductie tegenover. Dit effect is bij lagere temperaturen sterker door de tragere bladafplitsing.



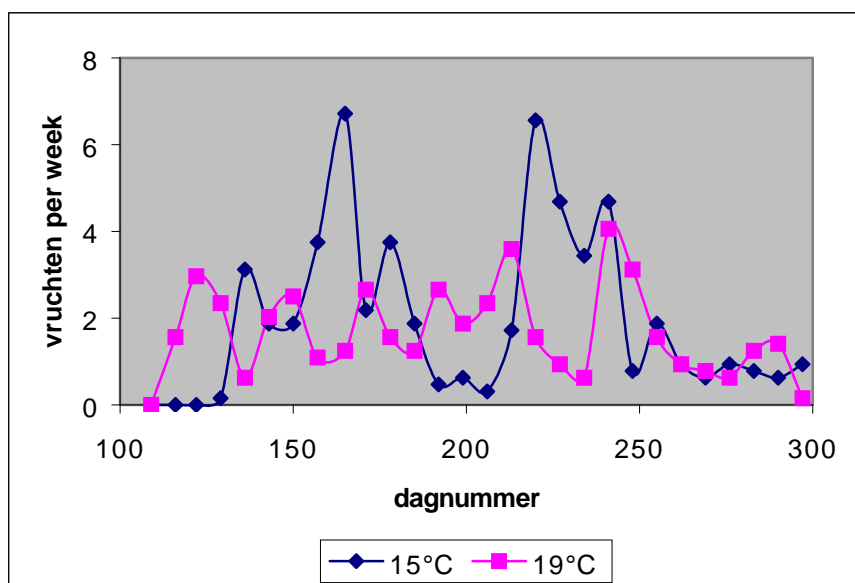
Figuur 3.5 - Productie van paprika cv. 'Spirit' gedurende te gehele proefperiode (kg m⁻²), bij verschillende temperatuursetpoints (°C) en plantdichtheden (aantal planten per mat).

De verklaring voor het grote aantal geoogste vruchten bij 15°C, ondanks een tragere ontwikkelingssnelheid,

is dat de vruchtzetting sterk was gestimuleerd, zodat er gemiddeld meer vruchten tegelijk aan de plant hingen (fig. 3.6).



Figuur 3.6 - Aantal vruchten per m² bij paprika cv. 'Spirit' ten tijde van de tweede sloopwaarneming in relatie tot plantdichtheid (planten per m²) en temperatuursetpoint (°C).



Figuur 3.7 - Verloop van het aantal geoogste vruchten per week bij een temperatuursetpoint van 15°C (ruitjes) en 19°C (vierkantjes).

In fig. 3.7 zijn twee typische voorbeelden weergegeven van de patronen in het verloop van het aantal geoogste vruchten door het teeltseizoen. Afhankelijk van het temperatuursetpoint en de plantdichtheid ontstonden verschillende patronen. Bij 19°C was er sprake van de door telers zo gewenste regelmaat: om de ca. 4 weken werd een vrij bescheiden aantal vruchten rijp. Rond dag 200 is de regelmaat enigszins verstoord geraakt: het zesde zetsel kwam relatief laat en was ook groter dan de voorgaande. Bij 15°C is het verloop veel minder regelmatig. Er is meer sprake van overlap van vruchtzettingen, met in de zomer een lange periode zonder productie. Het aantal geoogste vruchten was bij 15°C ook aanzienlijk hoger dan bij 19°C. Het gemiddeld vruchtgewicht was echter lager, wat erop wijst dat het vruchtgewicht wordt bepaald door het aantal vruchten waarover een beperkte hoeveelheid assimilaten moet worden verdeeld.

3.4 Discussie

Ondanks dat de ingestelde temperaturen niet gedurende de hele proefperiode zijn gerealiseerd, zijn de behandelingscontrasten als zeer aanzienlijk te beschouwen. Met name de 15°C was, zoals verwacht, in de zomer niet te realiseren. Om toch zo veel mogelijk de temperatuurcontrasten te kunnen handhaven is ervoor gekozen om een stralingsinvloed op de temperatuursetpoints in te stellen, die opliep van 0°C bij een setpoint van 15°C tot 5°C bij een setpoint van 25°C. Het functioneren van het gewas is in elk geval in sterke mate door de temperatuurinstellingen beïnvloed. Zo bleek de gemiddelde ontwikkelingssnelheid van het gewas sterk temperatuurafhankelijk te zijn. Toch waren de effecten op productie (kg m⁻² paprikas) verrassend klein. Kennelijk beschikt paprika over compenserende mechanismen die onder sterk contrasterende omstandigheden toch voor een zeer constante totale productie zorgden. Een belangrijk compensatiemechanisme is de regulatie van de plantbelasting: de langere uitgroeiduur bij lagere temperatuur werd gecompenseerd door een hogere plantbelasting. Ook de effecten van plantdichtheid werden gecompenseerd; het aantal vruchten per plant was omgekeerd evenredig met het aantal planten per m². De geringere productie bij de laagste plantdichtheid in de 15°C-afdeling is te verklaren uit de geringere totale lichtonderschepping die het resultaat was van het relatief laat bereiken van een voldoende hoge bladbedekkingsgraad (LAI). In ieder geval is duidelijk geworden dat paprika temperaturen in het gebied tussen 15 en 30°C uitstekend verdraagt. De toepassing van energiebesparende klimaatregeling hoeft dus niet te worden beperkt door een geringe bandbreedte voor de kasluchttemperatuur.

De regulatie van de plantbelasting is een belangrijk element in het mechanisme waarmee planten hun behoefte aan assimilaten (sink) af kunnen stemmen op de aanmaak daarvan (source). Om de dynamiek van de groei van het gewas onder wisselende omstandigheden te kunnen begrijpen en voorspellen is het nuttig om een balans op te maken van de aanmaak en verwerking van assimilaten. Het gewas vangt licht op en maakt assimilaten. Deze worden verdeeld over vegetatieve (bladeren, stengels, wortels) en generatieve (bloemen, vruchten, zaad) organen. De verdeling vegetatief/generatief ligt bij veel gewassen niet vast maar kan worden bepaald door plantbelasting en aanbod van assimilaten. In het begin zorgt de allocatie van assimilaten naar de bladeren voor meer lichtbenutting en extra groei, later bereikt de effectieve bladbedekking een maximum en neemt het relatieve belang van de factor bladgroei af. Niet alle assimilaten zijn beschikbaar voor groei; ook het onderhoud van bestaande plantdelen kost wat. Om de verdeling van de assimilaten over de plant te beschrijven wordt het concept sink-competitie gebruikt; dit betekent dat de allocatie van assimilaten naar een bepaald orgaan wordt bepaald door de verhouding tussen de potentiële groei van het betreffende orgaan en die van de totale plant. De feitelijke groei van het orgaan per dag hangt af van de dagelijks netto beschikbare hoeveelheid assimilaten voor groei en van de allocatiecoëfficiënt. De plant splitst voortdurend nieuwe organen af, die in potentiële eigenschappen gelijk zijn aan de eerder gevormde organen. Het tempo van afsplitsing wordt voornamelijk bepaald door temperatuur. Ook de uitgroeiduur van organen is grotendeels temperatuurbepaald. Tussen afsplitsing en uitgroei zitten meestal enkele regulatiestappen die de plant in staat stellen om groei en ontwikkeling te coördineren. Het gaat hier om dormancy en het doorbreken daarvan, knop-, bloem- en vruchtabortie en zetting. Deze processen reageren vooral op de fysiologische toestand van het gewas, met name de koolhydratenstatus en hormoonbalans zijn van belang. Soms wordt gerapporteerd dat ook afsplitsingstempo en uitgroeiduur worden beïnvloed door de koolhydratenstatus.

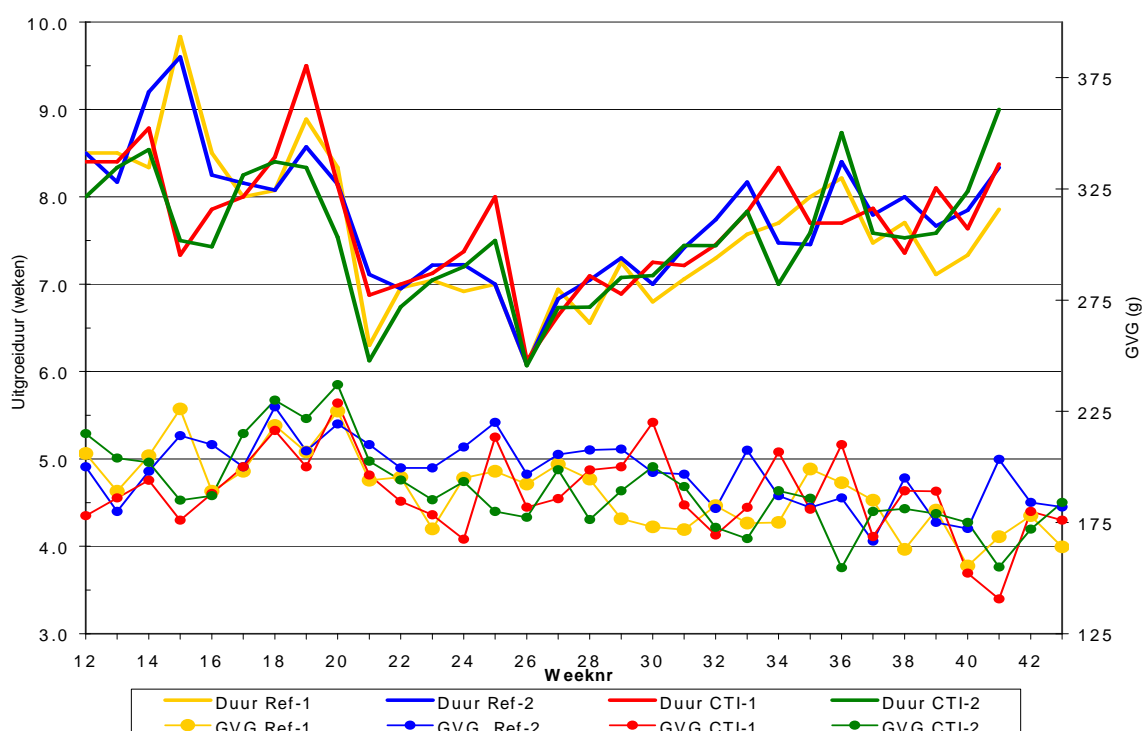
Wanneer bij paprika het gewas in balans is volgen de zettingen elkaar regelmatig op en worden ze zetsels ook niet te groot, zodat regelmatig vruchten van voldoende kwaliteit en gewicht kunnen worden geoogst. Verstoring van dit proces leidt tot een minder regelmatige opeenvolging van zetsels, terwijl bij een te zware plantbelasting de vruchten te licht blijven. De regulatie van de zetting is een uitgesproken dynamisch proces, dat wordt bepaald door zowel de actuele klimaatomstandigheden als door de toestand van het gewas. Vooral de actuele plantbelasting is hierbij een belangrijke factor. De dynamische aard van dit proces brengt met zich mee dat de reacties van het gewas op veranderlijke klimaatomstandigheden lang door kunnen werken, en daardoor moeilijk te voorspellen zijn. Meer nog dan bij de meeste gewassen zullen daarom de grenswaarden voor temperatuurintegratie variabel zijn. Sterker dan bij de meeste andere gewassen in de glastuinbouw geldt dus voor paprika dat inzicht in de dynamiek van zetting en plantbalans noodzakelijk is om temperatuurintegratie verantwoord te kunnen toepassen, en om de

energiebesparingsmogelijkheden daarvan volledig te kunnen benutten. Temperatuurintegratie zal dus bij dit gewas hand in hand moeten gaan met het beheersen van de plantbalans. Omdat het in balans houden van het gewas momenteel in de praktijk ook al een moeilijke en spannende zaak is door het ontbreken van goed inzicht in de dynamische aspecten van zetting en plantbelasting ligt hier echter ook een duidelijke kans: als we die dynamiek goed kwantitatief in beeld kunnen krijgen, zal temperatuurintegratie niet alleen energiebesparing op gaan leveren, maar tevens een betere beheersing van het productieproces. In verband met de sterke invloed van de actuele toestand van het gewas zal het benodigde inzicht uitsluitend kunnen worden verkregen op basis van een dynamisch gewasmodel.

4 Nadere analyse van productiegegevens uit de praktijk

4.1 Inleiding

Als onderdeel van het project 'Praktijkdemonstratie meerdaagse temperatuurintegratie' zijn in het jaar 2000 waarnemingen gedaan in 4 afdelingen met paprika op het bedrijf Omega te Wateringen (van den Berg et al., 2001). Per afdeling zijn complete datasets bewaard gebleven van kas- en buitenklimaat, productie (aantal en versgewicht van de vruchten), plantbelasting en uitgroeiduur. Deze datasets zijn gebruikt voor het vooraf vaststellen van verbanden en trends.

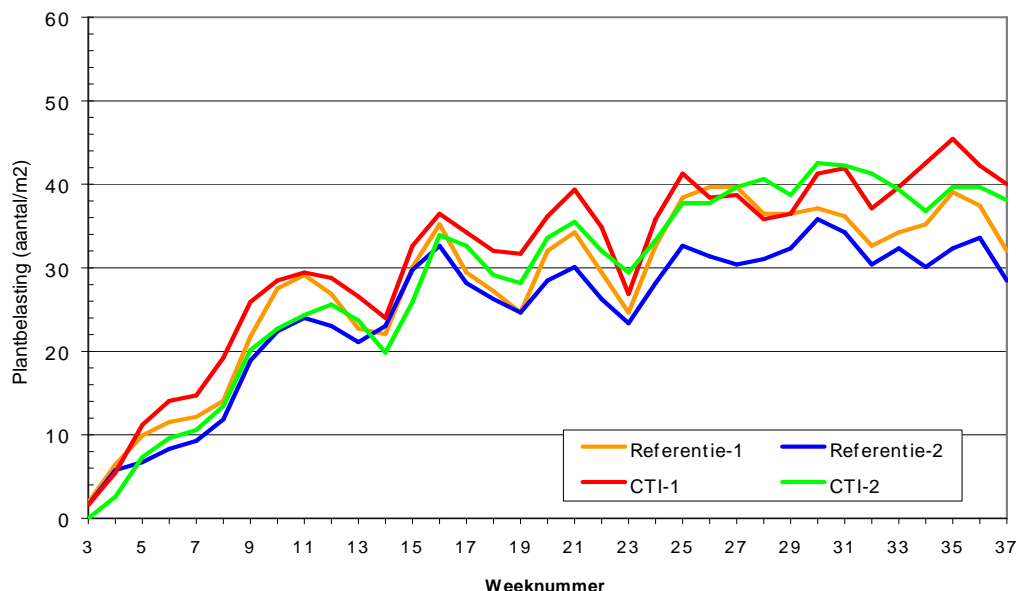


Figuur 4.1 - Paprika uitgroeiduur in weken vanaf zetting en het gemiddeld vruchtgewicht (GVG in gram vers) voor de beide telvelden van referentie- en CTI-regeling (van den Berg et al., 2001).

4.2 Materiaal en methoden

De proef werd uitgevoerd in een moderne Venlokas met energie scherm, oppervlakte 22.000 m², bouwjaar 1997. Het kasklimaat werd geregeld met een meerdaags optimaliserende klimaatregelaar, de Econaut CTI van Hoogendoorn Automatisering BV. De kas was door middel van een transparante plasticfoliewand in tweeën verdeeld. In elk deel waren twee telvakken uitgezet, waarin gewasmetingen werden verricht. Elk deel werd door de klimaatcomputer beschouwd als twee aparte regeleenheden. In een deel werd als referentie een conventionele klimaatregeling nagebootst door de Econaut CTI-regeling geen optimaliseringsruimte te geven. In het andere deel kreeg de regelaar wel (een beperkte hoeveelheid) optimaliseringsruimte. Geteeld werd het ras Fiësta, zaaidatum 25/10/99 en plantdatum 02/12/99. De proef startte op 02/02/00. De volgende gewaswaarnemingen werden verricht: van tien planten per telvak

werden genoteerd: de zetting, het aantal vruchten, de uitgroeiduur van de vruchten, de plantlengte, de oogst (aantal en gewicht) en de sortering. Uit deze gegevens werd de plantbelasting en het aantal vruchten per m² berekend.



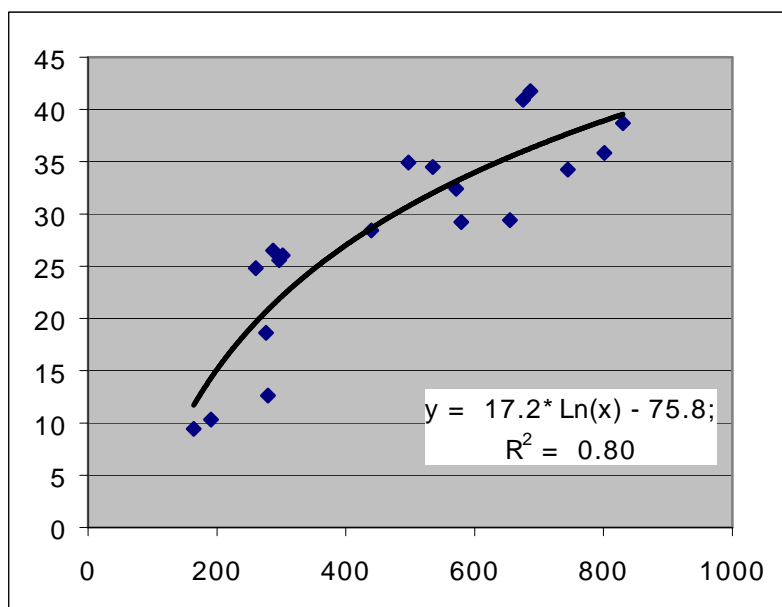
Figuur 4.2 - Plantbelasting (6 'vluchten') bij paprika voor de vier telvelden, twee referentie- en twee CTI-regeling.

4.3 Resultaten

Het toepassen van de integrerende klimaatregeling (Econaut CTI) had weinig effect op productie en kwaliteit (van den Berg et al., 2001). Ook de effecten op energieverbruik waren minimaal. Dit wordt voornamelijk toegeschreven aan de beperkte optimaliseringsruimte die de regelaar in deze proef heeft gekregen. Voor een analyse van de oorzaken van dit fenomeen zie Buwalda (2002). Ook Fiësta vertoonde tijdens de teelt het karakteristieke patroon van opeenvolgende zettingsgolven (fig. 4.2). De algemene trend was dat de plantbelasting in een afvallend patroon toenam naarmate het teeltseizoen vorderde. Vanaf ca. week 30 was de plantbelasting in de afdelingen met CTI wat groter. Het gemiddeld vruchtgewicht bereikte een maximum rond week 19 (fig. 4.1). De uitgroeiduur van de vruchten was minder in de zomer dan in het voor- en najaar. Ook lijkt er sprake te zijn van een evenredigheid tussen uitgroeiduur en de plantbelasting gedurende de weken voorafgaand aan de oogst.

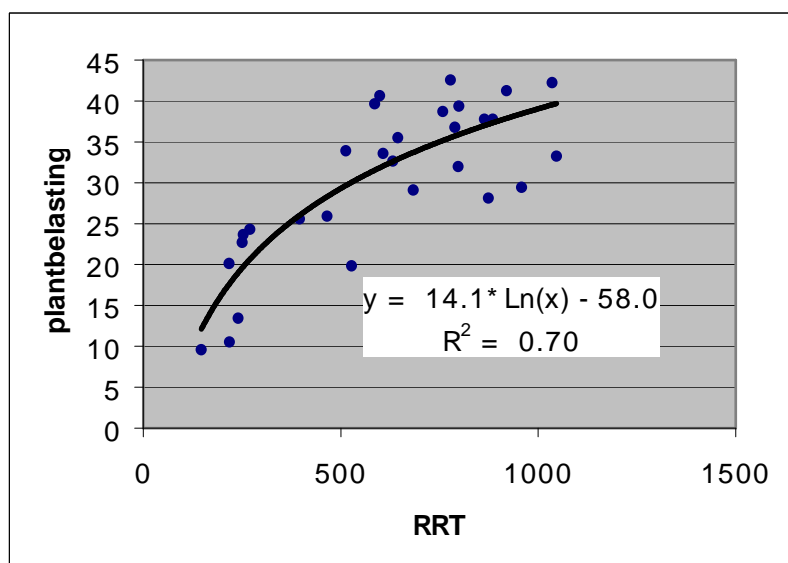
Door Liu & Heins (1997) is gewezen op het belang van de factoren licht en temperatuur op het gewas, waarbij de groei (toename van biomassa) vooral door het licht wordt bepaald, en ontwikkeling (toename en uitgroei van bladeren, internodiën en vruchten) afhankelijk is van de temperatuur. Hoe een plant er uiteindelijk uit komt te zien wordt bepaald door de balans tussen groei- en ontwikkelingsprocessen, en is niet te verklaren op grond van de invloed van de afzonderlijke factoren. Zij correleerden verschillende plantkenmerken met de verhouding tussen de lichtsom en de gemiddelde temperatuur boven een drempelwaarde. Voor deze verhouding werd de term RRT voorgesteld: de *Ratio between Radiant and Thermal energy*. Parameters zoals stengeldikte en aantal zij scheuten bleken positief gecorreleerd te zijn met RRT. In het geval van vruchtgroentegewassen zoals paprika kan worden verondersteld dat de RRT van invloed kan zijn op de belastbaarheid of draagkracht van het gewas. De resultaten in fig. 3.6 geven aan dat paprika inderdaad op een hogere lichtbeschikbaarheid (bij lage stengeldichtheid) en een lage teelttemperatuur reageert met een hoge plantbelasting. Dit is in overeenstemming met de theoretisch te verwachten effecten van de source/sink-balans op de vruchtzetting: een paprikaplant reageert op een veronderstelde hoge source/sink-verhouding door relatief veel vruchten te laten zetten. Uit fig. 4.3 blijkt dat

er inderdaad een vrij sterk verband bestaat tussen de geregistreeerde plantbelasting in de Omega-proef en de waarde van RRT: 80% van de variatie kon worden verklaard met een eenvoudige logarithmische functie. Omdat teeltgegevens bij paprika normaal eens per week worden geregistreerd is de RRT-waarde hier berekend als de lichtsom per week (J cm^2), gedeeld door de gemiddelde weektemperatuur, verminderd met de drempeltemperatuur. Op grond van een analyse van de gegevens uit proef A is bij de berekening van RRT uitgegaan van een drempelwaarde voor de temperatuur van 7.5°C . De eenheid van RRT wordt hiermee dus $\text{J cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.



Figuur 4.3 - Plantbelasting (vruchten per m^2) van paprika Fiësta als functie van RRT. Voor de berekening van de waarde van RRT werd het licht gecorrigeerd voor kastransmissie en lichtabsorptie (functie van LAI); op de temperatuur werd een drempelwaarde van 7.5°C in mindering gebracht. De data hebben betrekking op de eerste helft van de teelt.

De relatie in figuur 4.3 is berekend op basis van gegevens uit de eerste helft van het teeltseizoen (t/m week 23). Voor de dataset over de hele teeltperiode blijft het verband bestaan maar wordt het iets zwakker (figuur 4.4). Het is denkbaar dat in de laatste teeltfase de plantbelasting eigenlijk te hoog is voor de afnemende RRT, en dus geen balansstoestand weerspiegelt. Het gaat hierbij om de groep hoog liggende datapunten bij RRT-waarden rond 600.



Figuur 4.4 - Verband tussen RRT ($\text{J cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) en plantbelasting (vruchten per m^2 in afdeling 4 voor het complete teeltseizoen. Voor overige details zie figuur 4.3.

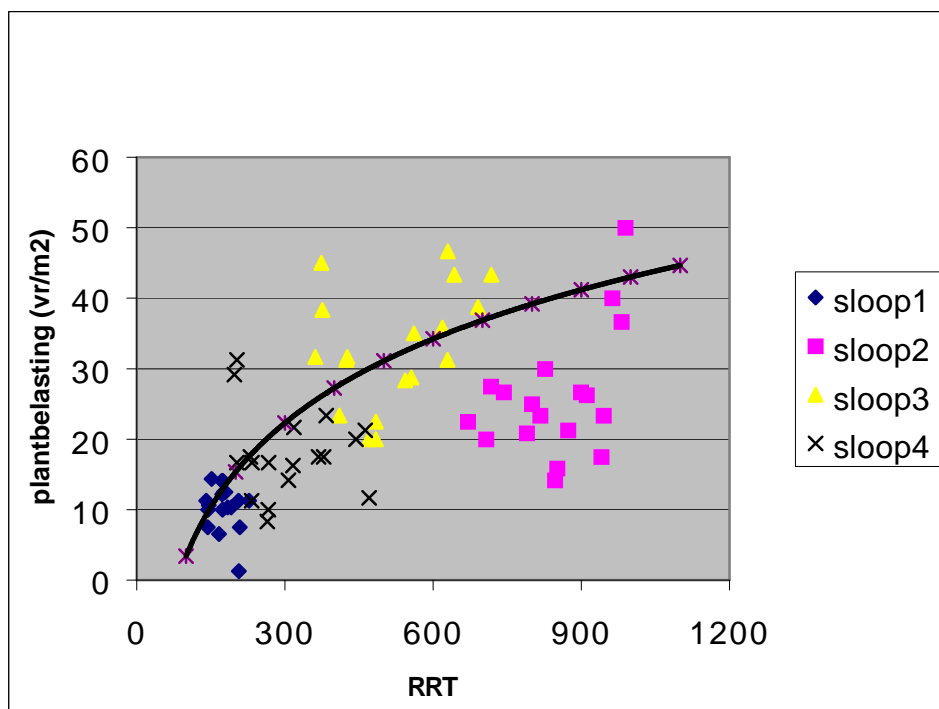
Een andere kanttekening die moet worden geplaatst is dat het aantal vruchten slechts een ruwe benadering

geeft van de feitelijke plantbelasting, omdat de mate waarin de uitgroeiende vrucht assimilaten onttrekt aan de plant sterk afhankelijk is van het ontwikkelingsstadium. Om die reden zou het verband tussen het aantal vruchten en de RRT dus wellicht ook maar beperkt geschikt zijn voor het vaststellen van de balansstoestand. Om hier een meer betrouwbare uitspraak over te doen is modelmatig inzicht vereist in het feitelijke verloop van de plantbalans. Hoewel zeer aannemelijk is dat deze inderdaad op de veronderstelde wijze wordt beïnvloed door RRT, is eveneens duidelijk dat er meerdere factoren in het spel zijn. In dit verband kunnen de opeenvolgende zettingsgolven worden beschouwd als oscillaties rond een balansstoestand. Dit dynamische effect wordt veroorzaakt doordat de assimilatenvraag van jonge, pas gezette vruchtjes veel geringer is dan die van grote. Voor de regulatie van de zetting heeft dat tot gevolg dat het feed-backsignaal pas laat tot stand komt waardoor te veel vruchtjes worden gezet en de plant door de balansstoestand heen schiet.

Afd.	Coefficient	Constante	R ²
1	10.17	-34.5	0.53
2	10.20	-37.7	0.64
3	11.02	-36.7	0.63
4	14.06	-58.0	0.70
alle	11.42	-42.1	0.58

Tabel 4.1 - Parameterwaarden voor de functie: Plantbelasting = $a \cdot RRT + b$. De functies zijn gefit voor de 4 afdelingen apart, op data over de gehele teelt (voor verdere details zie figuur 4.3).

Wanneer de voorspellende waarde van RRT wordt getoetst door te kijken of op willekeurig gekozen tijdstippen de actuele plantbelasting in overeenstemming is met de waarde die volgt uit de RRT-curve (fig. 4.3) dan blijkt inderdaad dat er grote afwijkingen kunnen optreden (fig. 4.5). Op het tijdstip van oogst 2 waren juist de vruchten van de eerste zetting geoogst, behalve in de afdeling met 15°C (de 3 punten bij RRT = 1000 en plantbelasting 38 - 50 vruchten m²). Op het tijdstip van oogst 3 hingen bij de laagste temperatuur nog net de vruchten van het tweede zetsel aan de plant (groep punten bij RRT = 650 en plantbelasting 38 - 47 vruchten m²), terwijl bij de hoogste temperatuur de derde zetting al compleet was (bij RRT = 400 en plantbelasting 31 - 46 vruchten m²). Het is duidelijk dat de invloed van de opeenvolgende zettingsgolven relatief groot is. De voorspelende waarde van de RRT-curve is dus beperkt; de curve kan hoogstens dienen als indicatie van de balansstoestand rond welke de plantbelasting periodiek fluctueert.



Figuur 4.5 - Gegevens m.b.t. plantbelasting in de in sectie A beschreven proef op 4 verschillende dagen (sloepoogsten) die gelijkmatig over de totale teeltperiode waren verdeeld. De curve in de grafiek komt overeen met de RRT-functie in figuur 4.3.

4.4 Discussie

Het verband tussen RRT en plantbelasting (fig. 4.3) geeft een indicatie van de evenwichtswaarde voor de plantbelasting in relatie tot licht en temperatuur. Het bepalen van de ligging van dit evenwicht is belangrijk, omdat verwacht kan worden dat de feitelijke plantbelasting regelmatig zal fluctueren rond deze evenwichtswaarde. Wanneer de ligging van het evenwicht bekend is, zal het verloop van de fluctuaties in principe voorspelbaar zijn. Een perspectievolle veronderstelling is dat de regulatiemechanismen in het gewas bij een redelijk constant gehouden evenwichtswaarde uit zichzelf zullen resulteren in regelmatige fluctuaties. Met andere woorden: verstoringen van de regelmaat worden veroorzaakt door verstoringen in de balans. Dit zou betekenen dat het zou volstaan om de evenwichtswaarde redelijk constant te houden en schommelingen daarin te beperken, met name die schommelingen waarvan de frequentie in de buurt ligt van de eigen regelmaat van de zettingsgolven.

Dit verband kan worden gebruikt om bij een bepaalde waarde van RRT de bijbehorende gemiddelde plantbelasting te berekenen. Het principe kan echter ook worden omgedraaid door bij een vooraf bepaalde streefwaarde voor de plantbelasting voor een gegeven hoeveelheid licht het temperatuurniveau te berekenen dat zal resulteren in een (theoretische) balansstoestand. Feitelijk is er dan sprake van teeltsturing: het gericht beïnvloeden van het verloop van de teelt ten behoeve van het realiseren van een vooraf gesteld teeltdoel. Het teeltdoel bestaat dan in dit geval uit een streefwaarde voor de plantbelasting. Het is dan wel van belang om die streefwaarde goed te kiezen, zodat het teeltdoel in ieder geval fysiologisch haalbaar is. Bij het testen van dit sturingsprincipe (zie hoofdstuk 5) is een teeltplan opgesteld met per week de gewenste plantbelasting, die overeenkwam met de ontwikkeling van de plantbelasting in de tijd, geregistreerd in een normale productiekas.

Een onzekere factor is de drempeltemperatuur. Deze heeft geen invloed op de fit van de logfunctie. Omdat het principe is gebaseerd op de balans tussen groei en ontwikkeling zou je kunnen stellen dat de drempeltemperatuur gelijk is aan de hoogste temperatuur waarbij geen ontwikkeling meer plaatsvindt. Hierbij is de vraag of je moet kijken naar de top (het ontstaan van nieuwe vruchtjes) of naar de uitgroei van vruchten; de drempeltemperaturen (voor Spirit) zijn resp 8 en 2°C. Het is belangrijk om dit te weten omdat dit de amplitude van het stuursignaal (zie hoofdstuk 5) enorm beïnvloedt.

Ook moet de kanttekening worden gemaakt dat niet de plantbelasting (aantal vruchten per m²), maar waarschijnlijk feitelijk de totale sinksterkte (assimilatenvraag) van het gewas de bepalende factor is voor de plantbalans (De Koning, 1994; Heuvelink, 1996). Deze kanttekening is met name voor het begin van de teelt relevant; het aantal gezette vruchten is dan nog beperkt, maar de sinksterkte neemt wel toe naarmate de vruchten zich verder ontwikkelen. De sinksterkte wordt bepaald als de som van onderhoudsademhaling en potentiële groei van alle onderdelen van het gewas. Van onderdelen die al zijn uitontwikkeld stopt de groei, en neemt de sinksterkte af tot het niveau van onderhoudsademhaling. Tijdens de uitgroeifase van een orgaan is de sinksterkte niet constant, omdat de potentiële groei afhankelijk is van de ontwikkelingssnelheid en het ontwikkelingsstadium (Marcelis, 1994; refs). De ontwikkelingssnelheid hangt daarbij af van de temperatuur (Wang, 1960; Heins et al., 2000; Buwalda, 2002). De potentiële groei van jonge, nog kleine organen is geringer dan wanneer ze al verder zijn uitgegroeid. Wanneer de uitgroeifase op zijn eind loopt neemt het groeipotentieel weer af. Dergelijke processen kunnen efficiënt worden beschreven met behulp van een Richards-functie (Richards, 1953). In een normaal productief vruchtgroentegewas komt ca. 60-80% van alle biomassa terecht in de vruchten (Marcelis en de Koning, 1995). Het is daarom duidelijk dat de ontwikkeling van vruchten sterk bepalend is voor de sinksterkte van het gewas.

Omdat het aantal vruchten aan de plant geen precieze afspiegeling is van de plantbelasting, en omdat de feitelijke plantbelasting periodiek schommelt rond de evenwichtswaarde, is aan het bepalen van de evenwichtswaarde aan de hand van het getelde aantal vruchten een onzekerheid verbonden. Verder geldt dat het aantal vruchten dat op elk moment aan de plant hangt grotendeels de resultante is van processen die in de daaraan voorafgaande periode hebben plaatsgevonden. Het leggen van een relatie met de RRT berekend over de meest recente 7 dagen is dan enigszins arbitrair. Ter ondersteuning van deze keuze kan worden gesteld dat door elk van de genoemde onnauwkeurigheden afwijkingen naar beide kanten kunnen

ontstaan. Daardoor zou het desondanks mogelijk moeten zijn om uit een grote hoeveelheid gegevens een robuuste relatie te destilleren.

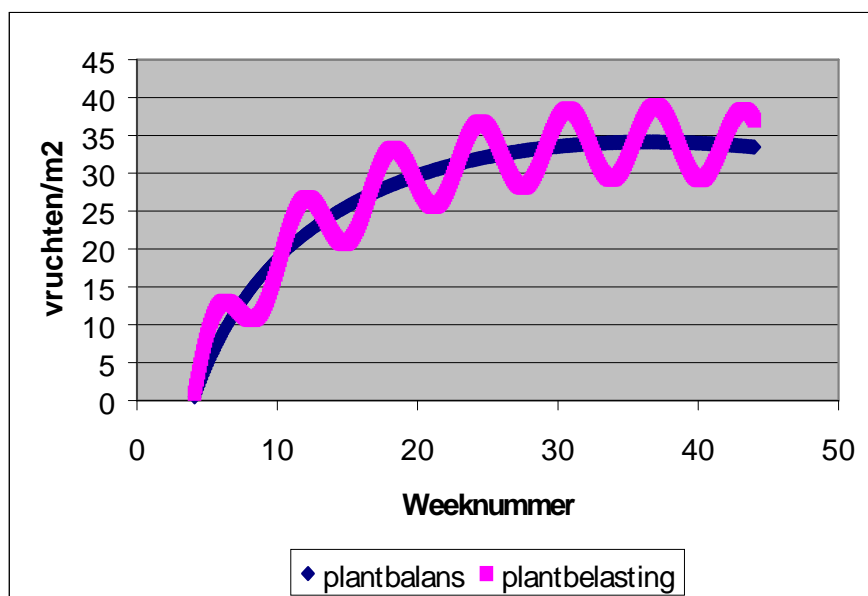
Het verband tussen RRT en het aantal vruchten aan de plant kan dus worden beschouwd als een praktische en robuuste, maar wel tamelijk ruwe maat voor de source/sinkbalans. Hierbij moet ook nog worden opgemerkt dat de source-activiteit niet alleen door de hoeveelheid instraling wordt bepaald. Zonder twijfel zal ook het CO_2 -niveau tijdens de lichtperiode van invloed zijn vanwege het directe effect van de CO_2 -beschikbaarheid op de fotosynthese. Ook is duidelijk dat de source-activiteit bepaald wordt door de hoeveelheid geabsorbeerd licht, waarbij de factoren kastransmissie lichtabsorptie in het gewas relevant zijn. De hoeveelheid licht die wordt geabsorbeerd hangt sterk samen met de bladbedekkingsgraad (LAI). Het is echter mogelijk om de hoeveelheid geabsorbeerd licht te schatten aan de hand van gegevens over kastransmissie, zonnestand en LAI, en de RRT-waarde te berekenen op basis van geabsorbeerd licht in plaats van globale straling.

5 Testen van een integrerend regelalgoritme op basis van het RRT-principe

5.1 Inleiding

Een fundamenteel probleem bij het toepassen van temperatuurintegratie is het kwantificeren van temperatuurafwijkingen. Alleen als de afwijkingen correct worden gekwantificeerd kan het al of niet optreden van een reactie van het gewas betrouwbaar worden voorspeld (zie hoofdstuk 1; Buwalda et al., 2000; Buwalda 2002). Uitgangspunt van deze studie is dat op eenvoudige wijze kan worden omgegaan met integratieruimte, grenswaarden en compensatie van afwijkingen wanneer temperatuurafwijkingen worden afgemeten aan de fysiologisch relevante streeftemperatuur. Verondersteld wordt dat deze streeftemperatuur overeenkomt met de temperatuur die resulteert in een bepaalde gewenste plantbalans. Doordat de plantbalans wordt bepaald door source/sink-relaties (de verhouding tussen aanmaak en verwerking van assimilaten) zal die balanstemperatuur variëren met het lichtniveau (Buwalda, 2002). Verder is duidelijk dat de feitelijke toestand van het gewas een regelmatige oscillatie vertoont rond de balanstoestand (zie hoofdstuk 4). Regeltechnisch moet dan de keuze worden gemaakt of de momentane toestand of de balanstoestand als referentie moet worden genomen. Gekozen is om de balanstoestand als uitgangspunt te nemen op grond van de volgende argumenten:

- het gevaar van oversturen wanneer de momentane toestand als referentie wordt genomen;
- de oscillatie rond de balanstoestand is waarschijnlijk zeer stabiel; uit aanvoercijfers op de veiling blijkt dat de productie op de meeste bedrijven dezelfde cycli volgt. Dit betekent dat de sturingsmechanismen die nodig is om de zetting in regelmatige golven te laten verlopen al in de plant zitten en dat het dus het in principe niet nodig is om hier met de klimaatregeling op te sturen;
- als op momentane plantbelasting zou worden geregeld dan zou de kans bestaan dat het gewas het feed-backsignaal wordt ontnomen waarmee het normaal de plantbelasting reguleert;
- het oscillerende verloop van de plantbelasting bij paprika wordt veroorzaakt doordat de sinksterkte van vruchten pas enkele weken na de zetting gaat meetellen. Om met deze dynamische effecten rekening te houden is modelmatig erg complex.



Figuur 5.1 - Schematische voorstelling van het verloop van de plantbelasting bij paprika in het teeltseizoen: de plantbelasting is weergegeven als een regelmatige oscillatie rond een geleidelijk verlopende plantbalans.

De keuze voor de RRT-lijn als uitgangspunt voor de klimaatregeling had als gevolg dat de streefwaarde voor de kasttemperatuur sterk werd bepaald door het lichtniveau. Door seizoensinvloeden en variaties in het weer varieerde de balanstemperatuur dan ook sterk. Het verloop van de balanstemperatuur werd verder bepaald door de actuele waarde van de gewenste plantbelasting. Deze waarde werd ontleend aan een teeltplan (dit is een lijst met waarden voor de gewenste plantbelasting per week). De balanstemperatuur, die dus werd berekend op grond van de actuele streefwaarde plantbelasting en de verwachte stralingssom werd doorgegeven aan de klimaatregelaar als streefwaarde voor de etmaaltemperatuur. Verschillen tussen de momentane kasluchttemperatuur en de gewenste etmaaltemperatuur werden gesommeerd, waardoor het verschil tussen de gewenste en de gerealiseerde temperatuurintegraal kon worden uitgedrukt in de vorm van één enkele variabele. Deze variabele werd vertaald naar momentane instellingen voor de stook- en luchtingssetpoints voor de regelaar volgens het principe dat eerder werd gehanteerd door Buwalda et al. (1999a,b).



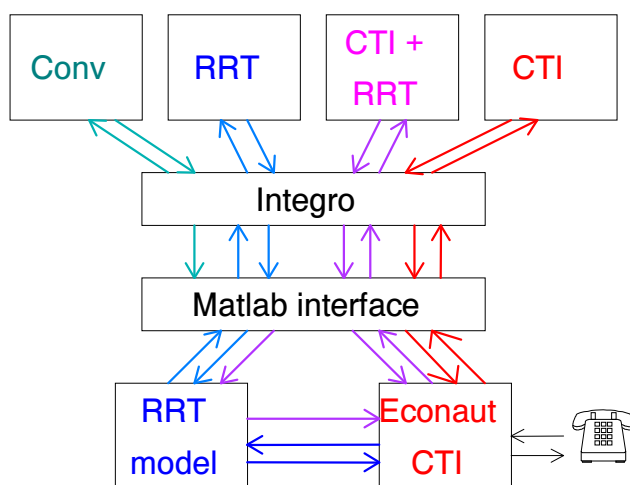
Figuur 5.2 - De interactieve gebruikersinterface van het stuurmodel waarmee de kasttemperatuur in vier afdelingen met paprika werd aangestuurd. Het model communiceerde met een Priva Integro en een Hoogendoorn Economic, waarop het klimaatprogramma Econaut CTI draaide. Foutmeldingen werden geregistreerd en konden worden bekeken door op de knop 'Errors zien' te klikken; de knop 'overzichten' opende een scherm met actuele waarden voor kasttemperatuur, setpoints, temperatuursommen, etc.

5.2 Materiaal en methoden

De proef werd uitgevoerd in 4 ruime onderzoeksafdelingen op PPO-locatie Horst, gedurende twee opeenvolgende teeltseizoenen: 2001 (geplant eind 2000) en 2002 (geplant eind 2001). Het klimaat werd geregeld door een Priva Integro klimaatcomputer. Voor deze regelaar is door Priva een speciale ItLogPlus datakoppeling ontwikkeld, via welke de stook- en luchtingssetpoints extern konden worden aangestuurd en actuele kasklimaat- en meteogegevens konden worden geëxporteerd naar een externe applicatie. De datakoppeling was verbonden met een PrivAssist PC waarop een speciaal binnen dit project ontwikkeld stuurprogramma draaide (fig. 5.2). Dit stuurmodel, dat was geprogrammeerd in Matlab 5.2, berekende de streefwaarden etmaaltemperatuur en de stook- en luchtingssetpoints, logde alle relevante gegevens en regelde alle communicatie tussen de verschillende systemen. Behalve met de Integro was de stuur-PC ook geïnterfaced met een Hoogendoorn Economic NT, waarop het optimaliserende stookprogramma Econaut CTI draaide (fig. 5.3). De Economic NT was voorzien van een modemverbinding voor externe aansturing via het programma EcoRemote, het ophalen van de lokale weersverwachting bij MeteoConsult en het oversturen van logfiles en werkfiles van het stuurmodel via een netwerkverbinding.

In het experiment werden 4 proefobjecten vergeleken: een afdeling werd aangestuurd door het RRT-model, een door de Econaut CTI, een derde door de Econaut CTI waarbij deze regelaar de temperatuurstreefwaarde overnam van het RRT-model. Deze behandelingen werden vergeleken met een conventioneel geregelde afdeling waarbij de teeltchef, zo veel mogelijk conform de huidige praktijk, direct instellingen deed op de Integro. In het laatstgenoemde geval werd de datakoppeling met de overige

systemen uitsluitend gebruikt voor het registreren van klimaatgegevens.



Figuur 5.3 - Schema van de datacommunicatie tussen het stuurmodel de Hoogendoorn Econaut CTI, de Priva Integro en de vier onderzoeksafdelingen bij PPO-Horst.

5.3 Resultaten

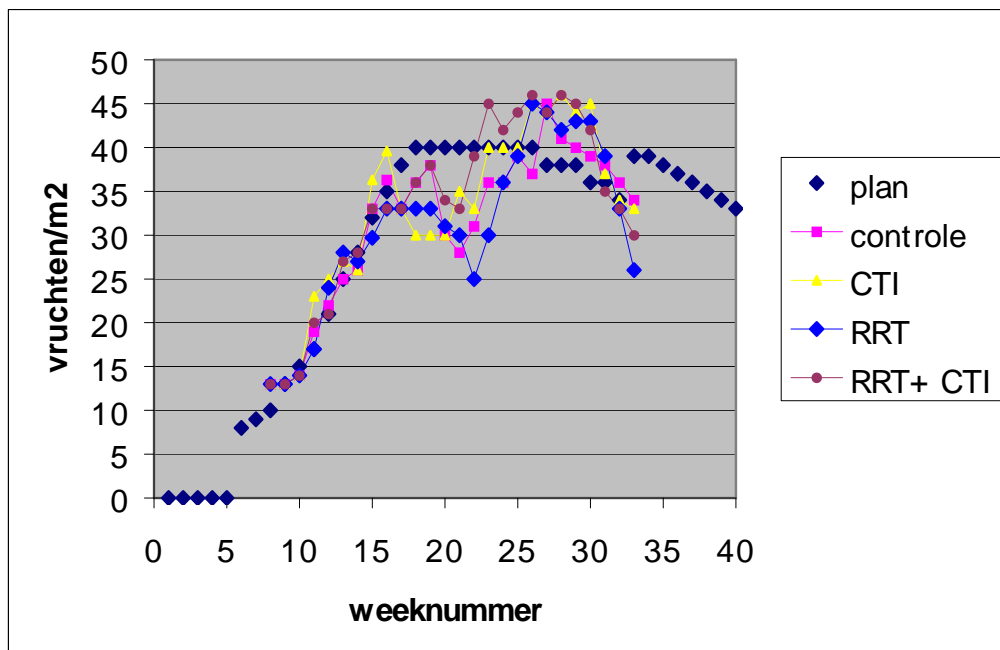
5.3.1 Technische realisatie

Het ontwikkelen van een betrouwbaar werkend stuurprogramma bleek een lastige klus te zijn. De eerste teelt heeft daarom nogal wat aanloopproblemen te zien gegeven. Om te beginnen kon pas relatief laat in de teelt worden gestart met de implementatie van het programma. Aanvankelijk was de gebruikersinterface nog vrij primitief, waardoor het voor de gebruikers moeilijk was om te beoordelen of het programma goed werkte, en storingen soms te laat werden opgemerkt. Zo heeft het vrij lang geduurd voordat een storing in het ophalen van gegevens van Meteoconsult was verholpen, waardoor in de teelt van 2001 het stuurmodel pas vanaf 2 mei correct functioneerde. Vanaf week 30 (eind juli) is een hardnekkig probleem opgetreden in de interne afhandeling van gegevens in het stuurmodel zelf. Uiteindelijk is er in 2001 dus slechts een kleine 3 maanden gestuurd. Toch hebben de inspanningen in 2001 een schat aan ervaring opgeleverd, waarvan in het tweede jaar volop kon worden geprofiteerd.

Op basis van de ervaringen in het eerste jaar is een verbeterde versie van het stuurprogramma ontwikkeld. In de eerste plaats werden alle functies in het stuurprogramma voorzien van een routine om storingen op te vangen en een gedetailleerde storingsmelding te geven. Al naar gelang van de aard van de storing werd het programma gestopt of werd volstaan met een melding. Zodra het programma was gestopt werd automatisch teruggevallen op eenvoudige standaardinstellingen, die vergelijkbaar waren met de controlebehandeling. Een tweede belangrijke verbetering was de toevoeging van een GUI (Graphical User Interface), zodat het model zich door middel van een eigen Windows-scherf met bedieningsknoppen en status-vensters aan de gebruikers presenteerde (fig. 5.2). De informatie die nodig was om te beoordelen of het model naar behoren draaide kon zo in één oogopslag van het scherm worden afgelezen. Naast knoppen voor starten, stoppen en afsluiten waren er twee knoppen waarmee schermen met meer gedetailleerde informatie konden worden opgeroepen: 'overzichten' en 'errors zien'. Op het scherm 'overzichten' was actuele informatie te zien m.b.t. de stralingsverwachting en de graadurensom, instelparameters voor de Econaut CTI, streefwaarden voor plantbelasting en kastemperatuur per afdeling. Ook konden grafieken worden opgeroepen met het verloop van belangrijke parameters in de tijd. Op het scherm 'errors zien' kon een logbestand worden bekeken met gedetailleerde foutmeldingen van het stuurprogramma, in chronologische volgorde. Het effect van deze verbeteringen was dat het stuurprogramma aanzienlijk

stabiel functioneerde en dat de gebruikers het programma doeltreffend konden bedienen en steeds een adequaat inzicht hadden in de stand van zaken. Zo kon worden bereikt dat de klimaatregeling in 2002 in de beoogde periode van wk 12 t/m 33 voor ca 95% van de tijd kon worden aangestuurd door het stuurmodel. De besturingssoftware is modulair geprogrammeerd in Matlab 5.2 en goed gedocumenteerd, en kan met betrekkelijk weinig inspanning geschikt gemaakt worden voor toepassing in vergelijkbare proeven.

5.3.2 Werken met streefwaarden voor de plantbelasting

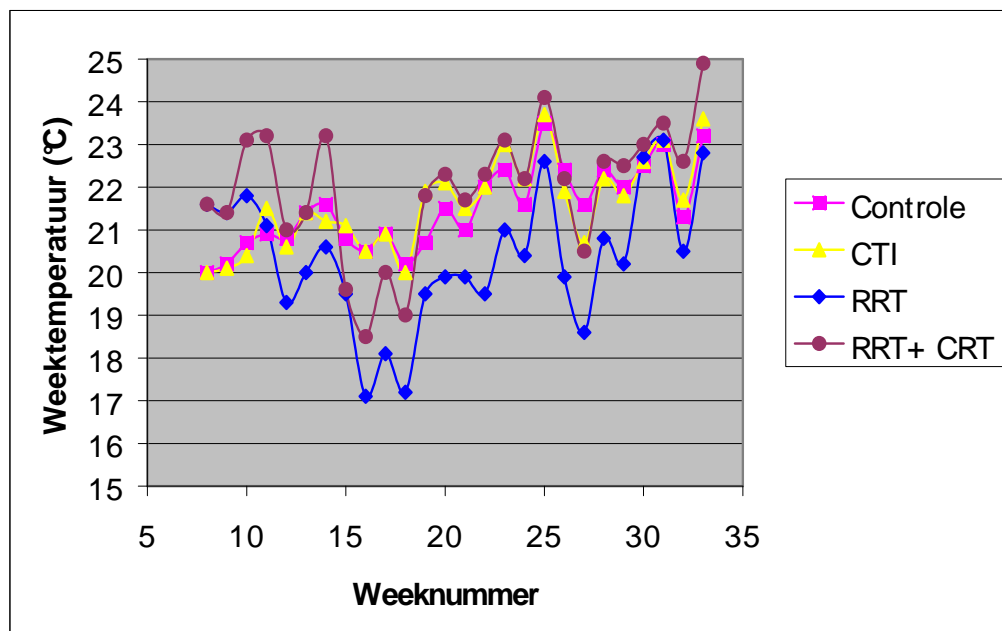


Figuur 5.4 - Geplande vruchtbelasting en gerealiseerde aantallen vruchten per m² tijdens de tweede proef met het RRT-model in Horst per behandeling. Na week 33 is het sturen en het oogsten van vruchten voortgezet, maar zijn geen gewastellingen meer verricht.

Streefwaarden voor de gewenste etmaaltemperatuur werden door het RRT-model berekend aan de hand van de stralingsverwachting en het gewenste aantal vruchten tijdens de betreffende week. De actuele streefwaarde voor het aantal vruchten werd dagelijks uit een teeltplan gelezen. Dit teeltplan werd ontworpen op basis van waargenomen aantallen vruchten per plant op een praktijkbedrijf (van den Berg et al., 2001). De gewenste etmaaltemperatuur werd in de behandeling 'RRT' direct gebruikt als referentietemperatuur voor een regeling van stoken en ventileren in de kas volgens het MTI-principe (Buwalda et al., 1999), waarbij 15 - 25 °C als bandbreedte voor de momentane kastemperatuur werd aangehouden. De grenswaarde voor de geïntegreerde temperatuurafwijking stond bij de Econaut CTI ingesteld op +/- 400 graaduren. Bij het RRT-model stond deze waarde aanvankelijk ingesteld op +/- 1000 graaduren met een dode zone van +/- 100 graaduren; dit is later aangepast tot +/- 400. Bij de behandeling 'RRT+CTI' werden deze waarden vertaald naar instellingen voor het Econaut CTI-programma. De ruimere grenswaarde voor de geïntegreerde temperatuurafwijking bij de RRT-behandeling had tot gevolg dat de regeling wat gemakkelijker lagere temperaturen realiseerde en niet zo snel omhoog werd gedwongen zoals in de combinatiebehandeling (RRT+CTI) gebeurde in de weken 10, 11 en 14. In de loop van de teelt is de graaddagenteller van de MTI-regeling enkele malen gereset, waardoor het gemiddelde temperatuurniveau in de kas wat lager is uitgekomen dan in de overige afdelingen.

In het begin van de tweede teelt bleek de streefwaarde voor het aantal vruchten per plant een te ruwe maat te zijn voor de gewenste plantbelasting. Tijdens de uitgroeiperiode is er sprake van een ontwikkeling in de assimilatenbehoefte van de vruchten: pas gezette vruchtjes vragen nog weinig assimilaten, halfwas vruchten vormen een aanzienlijk grotere belasting voor de plant. Dit betekent dat in het vroege voorjaar de toename van de plantbelasting door het eerste zetsel die samenhangt met de ontwikkeling van de vruchten gelijke tred houdt met de toename van de RRT-waarde doordat de zon hoger aan de hemel komt en de dagen zich

gaan lengen. Later in de teelt zijn er vruchten in diverse ontwikkelingsstadia aanwezig, waardoor dit effect enigszins wordt gecompenseerd. In de eerste teelt was het stuurmodel in dit vroege stadium nog niet gebruiksklaar, waardoor het genoemde probleem onopgemerkt is gebleven. De hier gekozen methode van sturen op basis van de relatie tussen aantallen vruchten aan de plant en RRT had tot gevolg dat na de eerste zetting een hoge temperatuur werd gerealiseerd in de door het model gestuurde afdelingen (wk 8 - 10 en vervolgens nog in wk 11 en 14 in de behandeling RRT+CTI). Hierdoor werd de tweede zetting uitgesteld in vergelijking met de planten in de conventioneel geregelde kas. In de afdeling waar alleen het programma Econaut CTI de temperatuur regelde, was het gerealiseerde temperatuurniveau gelijk aan dat in de conventioneel geregelde kas, en kwam ook de ontwikkeling van het aantal vruchten per plant overeen met de controlebehandeling. Ondanks dat inmiddels voldoende bekend was om een nieuwe versie van het model te programmeren die structureel rekening kan houden met dit effect, is om proeftechnische redenen besloten om dit niet te doen. In plaats daarvan is een tijdelijke correctiefactor in de relatie tussen de plantbalans en de verhouding straling/temperatuursom ingebouwd om tot de juiste afstemming te komen. Deze correctie had inderdaad het gewenste effect dat het temperatuurniveau daalde en het gewas weer tot zetting kwam.



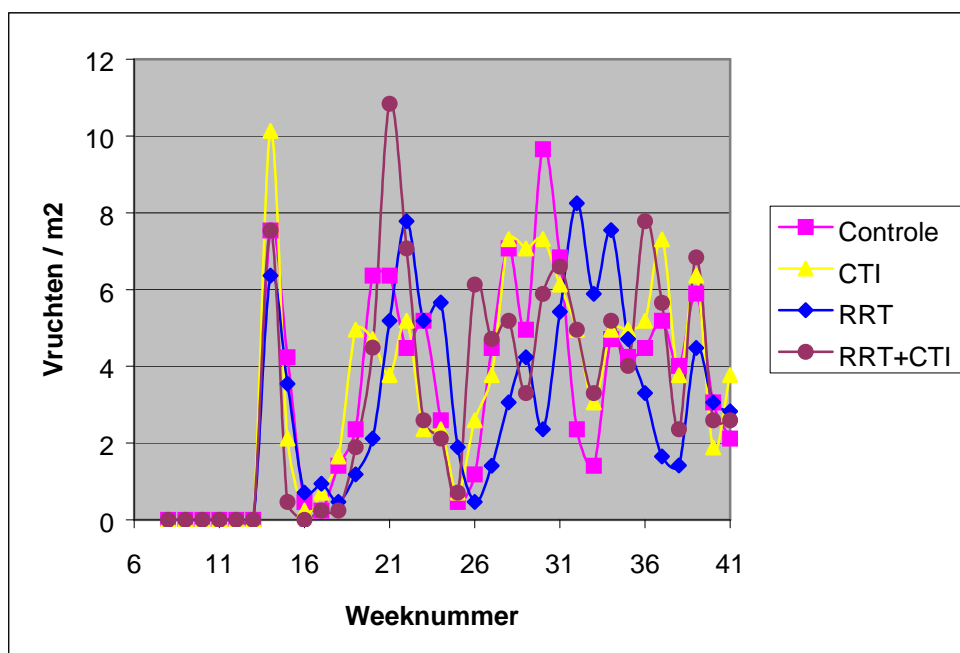
Figuur 5.5 - Gerealiseerde weekgemiddelden per behandeling van de temperatuur in de kas (°C) tijdens de proef in Horst in 2002.

5.3.3 Productie

Ondanks aanzienlijke verschillen in gerealiseerd klimaat als gevolg van het toepassen van verschillende regelprincipes (conventioneel, Econaut, RRT-model of een combinatie van beide) was de stand van het gewas in alle afdelingen goed en lagen de productiecijfers op een goed niveau. Een excursiegroep van vooraanstaande paprikatelers die tegen het einde van de teelt de proef bezichtigde was van oordeel dat ondanks de forse temperatuurverschillen alle gewassen goed in balans stonden.

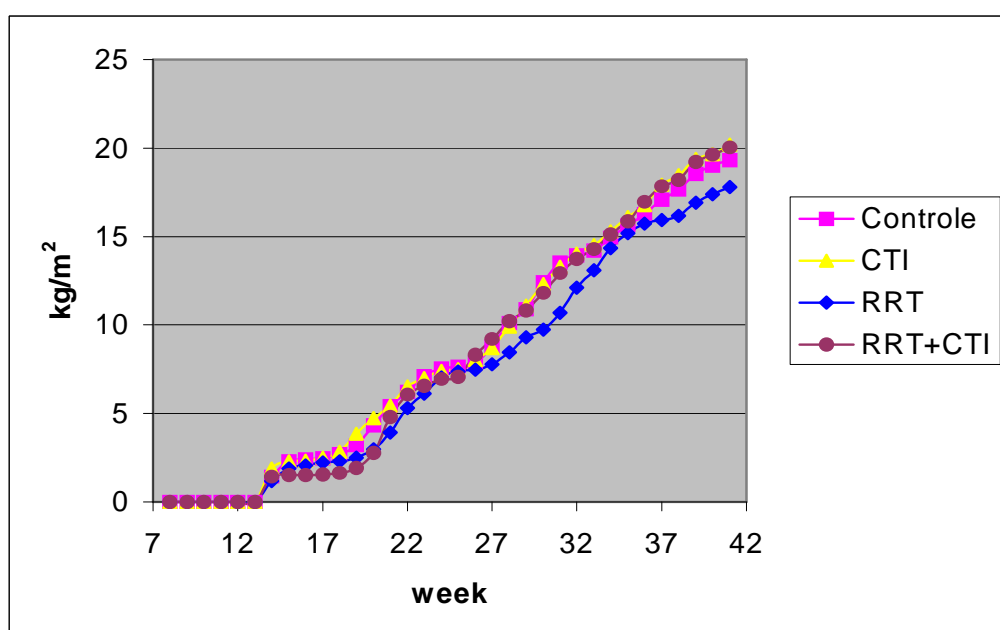
Tabel 5.1 - Productiecijfers en aantallen afwijkende vruchten per m² in de tweede teelt in Horst.

	Controle	CTI	RRT	RRT + CTI
Productie (kg m ⁻²)	19.3	20.2	17.8	20.8
Eerste keus keus (kg m ⁻²)	18.9	19.2	16.7	20.4
Aantal vruchten per m ²	113	119	101	120
Gemiddeld vruchtgewicht (g)	176	173	178	176
Knoopvruchten per m ²	0	0	0	0
Vruchten met neusrot met m ²	2	2	3	5



Figuur 5.6 - Verloop van het geoogste aantal vruchten per m² per week voor de verschillende behandelingen in de proef in Horst in 2002.

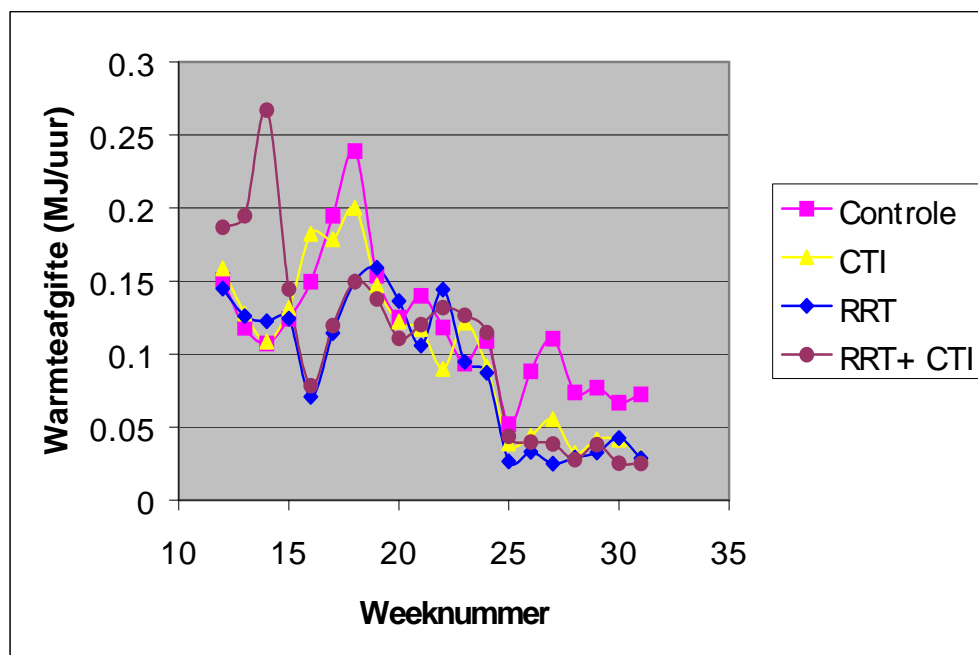
De vruchtkwaliteit lag op een vrij goed niveau, met 98, 95, 94 en 98% beoordeeld als eerste keus voor respectievelijk de behandelingen 'Controle', 'CTI', 'RRT' en 'RRT+CTI'. In het optreden van afwijkende vruchten waren geen behandelingseffecten te zien. In de eerste teelt bleek in alle behandelingen ongeveer 5% neusrot voor te komen, in de tweede teelt lag dat percentage rond de 2%, met een lichte trend naar iets meer neusrot in de twee afdelingen die volgens het RRT-principe werden geregeld (tabel 5.1). Gemeten percentages droge stof lagen rond de 8.5%, zonder duidelijke verschillen tussen de behandelingen.



Figuur 5.7 - Cumulatieve productie per behandeling (kg m⁻²) in de 2002 teelt in Horst.

Door de hogere temperaturen na de eerste zetting in de afdelingen die door het RRT-model werden aangestuurd (RRT en RRT+CTI) bleek de oogst van de tweede vlucht vruchten ongeveer 2 weken vertraagd te zijn (fig. 5.6). Wel lag het aantal geoogste vruchten van het tweede zetsel wat hoger. In fig. 5.7 is te zien dat de totale kg-productie van de afdeling waarin de combinatie van RRT en CTI de temperatuur bepaalde bij het oogsten van het tweede zetsel rond week 22 weer gelijk opliep met de controlebehandeling. In de 'RRT'-behandeling bleef de productie duidelijk achter bij de overige behandelingen, wat mogelijk samenhang met het relatief lage gemiddelde temperatuurniveau. Uiteindelijk kwam de productie in de twee afdelingen waarin de Econaut CTI actief was ('CTI' en 'RRT+CTI') iets hoger uit dan in de conventioneel geregelde kas. De totale productie lag wat lager dan gebruikelijk in de praktijk, wat te maken kan hebben met het relatief korte teeltseizoen en een wat lagere lichttransmissie in de proefkassen dan in moderne praktijkkassen. De productiecijfers in de eerste teelt waren redelijk vergelijkbaar met de tweede. De behandelingseffecten lagen iets anders, met 4% extra productie in de CTI-behandeling en 3% minder in de behandeling 'RRT+CTI'. Door de beperkte periode waarin het model in de eerste proef correct heeft gestuurd moet aan deze cijfers echter minder belang worden gehecht.

5.3.4 Energieverbruik



Figuur 5.8 - Verloop van de warmteafgifte per behandeling (MJ uur⁻¹) in de tweede proef in Horst.

Figuur 5.8 geeft het verloop van de warmteafgifte weer in de tweede proef in Horst. Doordat het effect van het RRT-principe op de streef temperatuur in de kas aanvankelijk niet correct werd toegepast ontstond een zeer hoge warmtevraag in de behandeling RRT+CTI. In de afdeling waar alleen het RRT-model regelde bestond deze zelfde warmtevraag, maar die werd niet direct doorvertaald naar hoge buistemperaturen vanwege een zeer ruime instelling van de toelaatbare afwijking in temperatuursom (zie paragraaf 5.2). Na het invoeren van een correctiefactor werd het stookgedrag in de behandeling 'RRT+CTI' aanmerkelijk rustiger. Omdat de piek in warmteafgifte rond week 14 niet representatief wordt geacht voor het functioneren van het stuurprincipe is bij de vergelijking van de warmteafgifte per behandeling (tabel 5.2) gerekend vanaf week 15. Naarmate het seizoen vorderde en de stookbehoefte afnam, werden de besparende effecten van de Econaut en het RRT-model geleidelijk meer en meer overschaduwde door de stookbehoefte in verband met het beheersen van de luchtvochtigheid. Feitelijk hoefde er vanaf eind mei al niet meer gestookt te worden om het gewenste temperatuurniveau te realiseren, en werd het verdere energieverbruik volledig bepaald door de ingestelde vochtbegrenzing.

Vanaf eind juni is besloten om wat minder scherp op vocht te regelen. In de periode van week 25 - 31 bleek daarna dat het energieverbruik in de conventioneel geregelde afdeling toch nog bleef schommelen rond een waarde van 0.08 MJ uur^{-1} , terwijl zowel de Econaut als het RRT-model het energieverbruik verder beperkten tot een niveau van 0.03 MJ uur^{-1} . De belangrijkste redenen voor het hoge energieverbruik in de conventioneel geregelde afdeling waren stookacties die standaard door telers in de praktijk worden toegepast om het gewas te 'activeren' en om meer assimilaten naar de vruchten te sturen. Deze acties zijn in de twee door het RRT-model aangestuurde afdelingen achterwege gelaten, maar stonden in de afdeling die door de Econaut CTI werd geregeld wel ingesteld. Kennelijk is door een integrerende regeling toch ook bij geforceerde stookpatronen nog aanzienlijk energie te besparen. De genoemde stookacties hadden overigens geen aantoonbaar effect op de productie of de vruchtkwaliteit.

Tabel 5.2 - Overzichtstabel van het energieverbruik (MJ m^{-2}) van de 4 afdelingen in relatie tot het gebruikte stookprogramma. De conventionele afdeling werd zo veel mogelijk conform praktijk ingesteld door de teeltchef. Het verbruik is berekend over de perioden dat het stuurmodel goed heeft gedraaid en is gecorrigeerd voor het verschillen in energieverbruik wanneer het klimaat in alle afdelingen op gelijke wijze wordt geregeld.

	Warmteafgifte			
	2001		2002	
	Absoluut (MJ m^{-2})	Relatief (%)	Absoluut (MJ m^{-2})	Relatief (%)
Conventioneel	269	100	334	100
Econaut CTI	245	91	280	84
RRT-model	306	114	236	71
RRT + CTI	270	101	248	74
Besparing RRT	-31	-12	65	21
Besparing CTI	30	10	21	8

5.4 Discussie

Het sturingsprincipe op basis van RRT dat werd gehanteerd in deze proeven is een functie van plantbelasting (aantal vruchten per m^2), gefit op de verhouding tussen de som van de dagelijks geabsorbeerde straling en de gemiddelde temperatuur boven een drempelwaarde. Aangenomen dat in onbelichte kassen de lichtsom een gegeven grootte is kan het principe op twee manieren worden toegepast: (1) bij een gegeven streefwaarde voor de vruchtbelasting kan bij een bepaalde lichtsom de bijbehorende temperatuur worden berekend; (2) bij een gegeven temperatuur kan het bijbehorende aantal vruchten worden berekend waarbij het gewas in evenwicht is. Op grond van een vergelijking van dit aantal met het feitelijk aantal vruchten per m^2 kan een voorspelling van de zetting worden gedaan. De laatstgenoemde toepassing heeft wel op de achtergrond meegedraaid in het stuurmodel, maar had geen consequenties voor het regelgedrag.

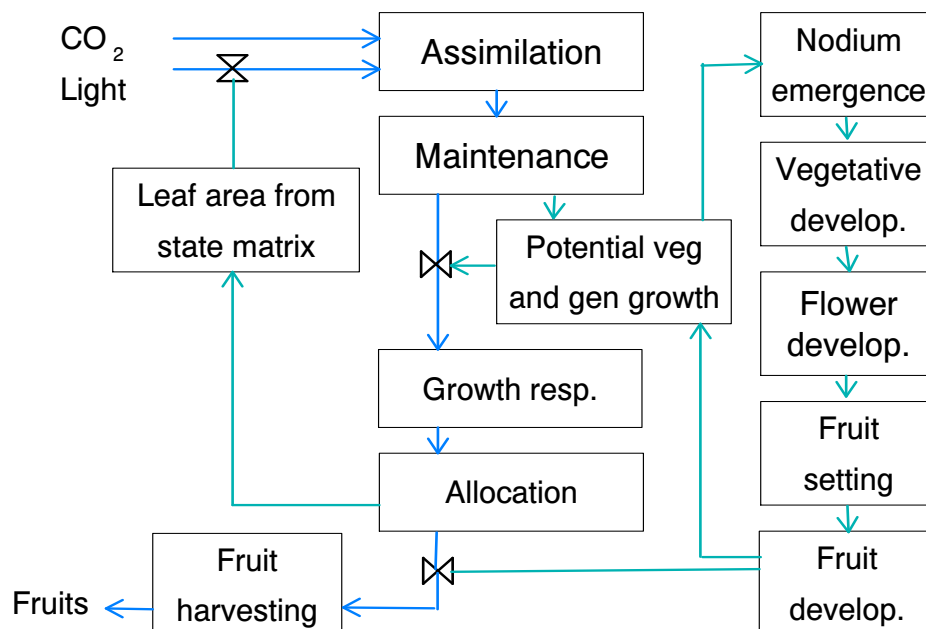
Uit deze proeven is duidelijk geworden dat het aantal vruchten per m^2 niet helemaal de correcte maat is voor de plantbelasting. Met name aan het begin van de teelt, wanneer er nog weinig vruchten aan de plant hangen, werkte dit storend. Desondanks is deze proef als bijzonder leerzaam te beschouwen. Zo is duidelijk geworden dat het evenwicht tussen aanmaak en verwerking van assimilaten in het gewas veel sterker reageert op de lichtcondities dan tot uitdrukking komt in de conventionele teeltwijze. Een meer lichtafhankelijke temperatuurregeling bij het zelfde gemiddelde temperatuurniveau kan op zichzelf al een flinke energiebesparing opleveren, omdat de passieve verhoging temperatuur bij hoge instraling mag worden toegelaten, waardoor de noodzaak tot stoken op donkere dagen afneemt. Daarnaast is gebleken dat het RRT-principe (met name in de fase van de teelt dat er voldoende gewas ontwikkeld is) kan dienen als referentie voor het bijhouden van temperatuurafwijkingen. Een verbeterde versie van RRT zou feitelijk de balansoestand van het gewas omschrijven waaromheen de feitelijke kastemperatuur fluctueert. In combinatie met een optimaliserend stookprogramma zoals Econaut CTI kan van deze speelruimte gebruik worden gemaakt zonder dat dit risico oplevert voor het gewas. Theoretisch zou het sturen volgens het RRT-principe het gewas beter in balans moeten houden dan een conventionele regeling, en daardoor dus een vermindering van het risico opleveren. In de eerste proef is de sturing te kort en waarschijnlijk te onnauwkeurig geweest om conclusies omtrent deze veronderstelling op te kunnen baseren. In de tweede teelt lijken inderdaad, na het aanvankelijke effect van de uitgestelde tweede zetting, de fluctuaties in aantallen vruchten wat minder groot te zijn dan in de controlebehandeling (fig. 5.6). Een tweede interessante uitkomst is de mogelijkheid om het algemene temperatuurniveau in de kas te gebruiken als sturingsinstrument bij het handhaven van de plantbalans. Twee jaar geleden was deze mogelijkheid onder paprikatelers onbekend; dit jaar bleek dat verschillende vooraanstaande telers deze methode zijn gaan toepassen. Dit betekent niet minder dan een doorbraak in het denken over temperatuur in de praktijk, en effent de weg voor de inzet van temperatuurintegratie, niet alleen voor energiebesparing maar ook als

sturingsinstrument. De associatie van het concept temperatuurintegratie met sturingsmogelijkheden en het actief beheersen van de plantbalans in plaats van met risico's en onduidelijke grenswaarden was een van de belangrijkste doelstellingen van dit project..

Ondanks de gebleken onnauwkeurigheid blijft het RRT-principe enkele zeer aantrekkelijke aspecten houden. Het is niet uitgesloten dat dit principe, of een iets geraffineerdere versie ervan, toch al een betere basis kan vormen voor het berekenen van temperatuurafwijkingen dan een conventioneel teeltrecept met een vaste temperatuurstreefwaarde. Doordat de plantbalans op basis van RRT zeer eenvoudig is te bepalen aan de hand van resultaten van vergelijkbare teelten (binnen studiegroepverband, resultaten van voorgaande jaren, etc) kan het zeer snel naar andere gewassen en rassen worden vertaald, zonder dat daarvoor per gewas eerst langdurige en complexe proeven en modelstudies nodig zijn.

6 Diverse modellen die zijn ontwikkeld in de loop van, of als vervolg op, dit project

In principe worden gewasmodellen samengesteld uit bestaande kennis over plantprocessen die is geformaliseerd in de vorm van functies. De kennis die in de functies wordt gestopt kan bestaan uit empirische verbanden ontdekt in meetresultaten of bekende processen en mechanismen, maar ook uit veronderstellingen (hypothesen) over bepaalde principes of verbanden. In dynamische gewasmodellen zijn de functies zo georganiseerd dat het mogelijk wordt om de achterliggende processen in onderlinge samenhang en in wisselwerking met de toestand van het gewas en omgevingsfactoren te bestuderen. Wanneer een model hypothetische functies bevat heeft het karakter van een onderzoeksinstrument, waarbij nieuwe kennis ontstaat door het vergelijken van het gedrag van het gemodelleerde gewas en een bestaand gewas onder dezelfde omstandigheden. Zijn alle functies in het model bekend (gevalideerd), dan krijgt het model meer het karakter van een voorspeller. Zowel hypothetische als gevalideerde modellen kunnen in principe in een regelaar worden ingebouwd om processen aan te sturen.



Figuur 7.1 - Schema van het dynamische gewasmodel ANMOD.

6.1 ANMOD

ANMOD (ANalytisch MODel) is een theoretisch mechanistisch model (fig. 7.1), waarin alle theoretische kennis van plantprocessen en hun interacties in de vorm van expliciete, mechanistische functies is ingebouwd. Deze functies zijn gekalibreerd op basis van de uitkomsten van de inleidende proef met 3 plantdichtheden en 6 temperatuurniveaus. Het gewas is in het model ingebouwd in de vorm van een toestandsmatrix in Matlab. Het gewas wordt beschouwd als een samenstelling van elementaire onderdelen, de phytomeren, die elk een eigen laag hebben in de toestandsmatrix elk phytomeer bestaat uit een aantal bladeren, twee internodieën (een voor elke stengel) en generatieve delen (bloemetjes en vruchten). Van alle onderdelen per phytomeer wordt informatie opgeslagen over leeftijd, ontwikkelingsstadium, gewicht, etc. De toestandsmatrix in Matlab is dus te beschouwen als een virtuele plant. Bij elke rekenstap wordt deze informatie per element ingelezen en herberekend. Het model is dynamisch omdat alle functies invloed hebben op toestandsvariabelen van het gewas, terwijl de toestand van de gewaselementen ook weer

invloed heeft op de resultaten van de functies. Het model komt qua structuur overeen met bestaande mechanistische modellen zoals TOMSIM, maar verschilt daarvan in die zin dat met name alle ontwikkelingsfuncties ook dynamisch zijn. Een interessante uitkomst van het model was dat het zettingsgolven kon simuleren. Het model was helaas zo ingewikkeld dat het niet is gelukt om het in het kader van dit project goed gekalibreerd te krijgen. Wel was het ontwikkelen van dit model een zeer leerzaam proces, en alle later ontwikkelde modellen bevatten elementen die oorspronkelijk voor ANMOD zijn ontwikkeld.

6.2 RRT, TIGG1 en TIGG2

Parallel aan de ontwikkeling van ANMOD is in het kader van dit project gewerkt aan een meer empirische benadering volgens het RRT-principe. De theoretische achtergronden van dit principe worden bediscussieerd in hoofdstuk B. Het RRT-model is niet mechanistisch in de zin dat de toestand van het gewas geen invloed heeft op de uitkomsten. Voordelen van een dergelijke eenvoudige benadering zijn dat er geen begrip van de achterliggende processen noodzakelijk is, het relatief weinig ontwikkelingstijd vergt, in principe redelijk robuust kan zijn, en weinig gedetailleerde informatie nodig heeft als input. De achterliggende gedachte kan worden verwoord in een citaat van de econoom Keynes, dat het beter is *"to be roughly right than to be precisely wrong"*. Een aantrekkelijk perspectief was dat deze benadering, bij gebleken geschiktheid, snel kan worden vertaald naar andere gewassen en niet de lange ontwikkelingstijd kost die voor complexe mechanistische modellen nodig is. Het RRT-model is in combinatie met het MTI-model (Buwalda et al., 1999) ingebouwd als stuurprincipe in het regelmodel dat is getoetst in Horst. De stuurmodellen kregen de naam TIGG1 en TIGG2 (zie hoofdstuk C), wat staat voor TemperatuurIntegratie met Gewaskundige Grenswaarden.

6.3 UGD

Ontwikkelen van het model UGD was een tweede empirische benadering, waarin werd getest of het mogelijk was om met een eenvoudige graaddagenfunctie de uitgroeiduur van vruchten te voorspellen. Voor veel akkerbouwgewassen is gebleken dat deze benadering een goede voorspellende kracht bezit. Bij paprika bleek echter de uitgroeiduur, ook wanneer deze wordt uitgedrukt in termen van temperatuursommen (graaddagen), variabel te zijn. De nieuw ontwikkelde methode voor het extraheren van de twee parameters voor de graaddagenfunctie (temperatuursom en drempelwaarde) kan echter wel zijn nut bewijzen voor andere processen waarvan de duur wel een sterke correlatie vertoont met de temperatuursom.

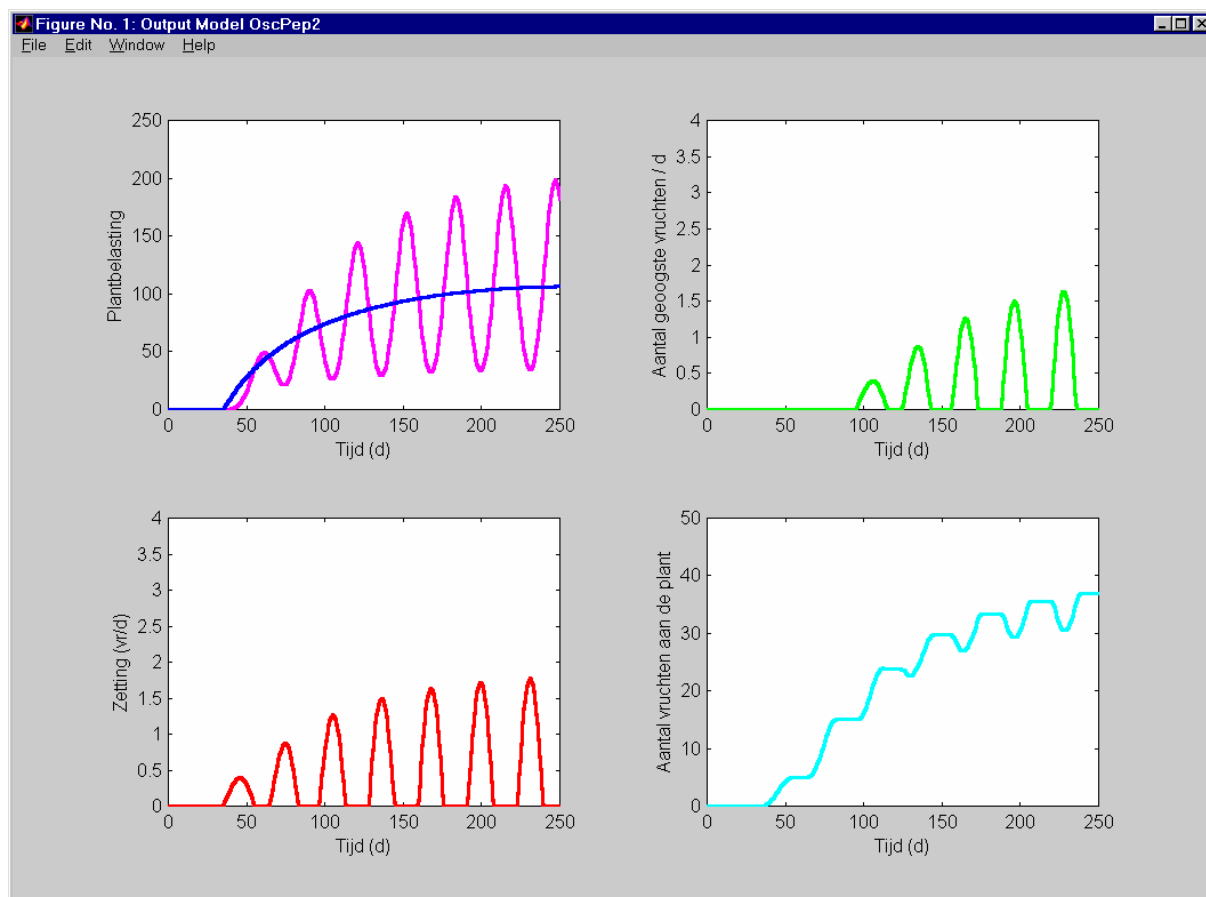
6.4 PepSim1

De geconstateerde variaties in uitgroeiduur bij paprika hebben geleid tot het ontwikkelen van een dynamisch model voor uitgroeiduur van de vruchten. PepSim staat hierbij voor **Pepper Simulator**. Het model is dynamisch van karakter omdat aantal en ontwikkelingsstadium van de vruchten van invloed zijn op de ontwikkelingssnelheid. PepSim1 maakt gebruik van principes die oorspronkelijk zijn ontwikkeld voor ANMOD, maar is feitelijk ontwikkeld in het kader van een vervolgproject (PPO project 420066, Oogstvoorspelling Paprika). Met dit model is het mogelijk om een groot deel van de waargenomen variatie in uitgroeiduur van paprikavruchten na te bootsen.

6.5 OscPep

De in fig. 4.5 getoonde verschillen tussen de RRT-lijn en de feitelijke aantallen vruchten aan het gewas hebben geleid tot de ontwikkeling van een eenvoudig dynamisch model, genaamd OscPep (**O**scillations in **P**epper). Het principe van dit model is dat variaties in plantbelasting worden beschreven als oscillaties rond een evenwichtstoestand (fig. 7.2). De centrale functies van het model worden binnenkort opgenomen in een

nog te ontwikkelen nieuwe versie van het model PepSim. Het model OscPep kan worden beschouwd als spin-off van het hier gerapporteerde project, maar is overigens ontwikkeld buiten het kader van dit project.



Figuur 7.3 - Grafieken gegenereerd door het model OscPep tonen het gesimuleerde verloop van zetting, aantal vruchten, oogst en plantbelasting in de tijd.

6.6 PepSim2

Het model PepSim2 is een dynamisch model dat aan de hand van klimaatgegevens en registraties van zetting aantallen vruchten aan de plant en oogstgegevens een voorspelling kan doen van te verwachten oogstbare vruchten, zowel de aantallen als het oogstgewicht. Dit model is grotendeels gebaseerd op elementen die zijn ontwikkeld in het kader van het hier gerapporteerde project, maar is overigens buiten het kader van dit project ontstaan. De functies van dit model worden in het kader van het project Oogstvoorspeller Paprika (PPO project 420066) ingebouwd in de oogstvoorspeller van LetsGrow.com.

6.7 PepSim3

Het model PepSim3, dat momenteel in ontwikkeling is, wordt de uiteindelijke versie voor de oogstvoorspeller van LetsGrow.com. De belangrijkste uitbreiding van de functionaliteit wordt een dynamische voorspelling van de vruchtzetting. Hierdoor kan de oogstvoorspeller door telers ook worden gebruikt als beslissingsondersteuning bij het bepalen van het temperatuurniveau waarbij, afhankelijk van de stralingsverwachting en de toestand van het gewas, het gewas in balans blijft en de productie regelmatig zal verlopen.

6.8 PepSim-GTI

De functionaliteit van de oogstvoorspeller in LetsGrow.com kan in principe worden uitgebreid met een dynamische berekening van de grenswaarden voor temperatuurintegratie (GTI). Hiermee worden gebruikers die beschikken over een integrerende klimaatregelaar zoals de Econaut CTI in staat gesteld om die instellingen voor de regelaar te kiezen die garant staan voor een maximale energiebesparing, zonder dat daarbij risico ontstaat op opbrengstderving of kwaliteitsverlies. In het hier gerapporteerde project is al gebleken dat de Econaut CTI met succes kan worden gekoppeld aan een stuurmodel. In principe is het technisch mogelijk om een dergelijke koppeling met internettechnologie tot stand te brengen, zodat de regelaar automatisch de instellingen overneemt van de oogstvoorspeller. De grenswaarden kunnen echter ook gewoon als getallen op een website beschikbaar gesteld worden, zodat het gebruik van deze functionaliteit onafhankelijk zal zijn van het merk en type van de klimaatregelaar. Ontwikkelen en toetsen van PepSimGTI valt buiten het bestek van het huidige project Oogstvoorspeller Paprika, en hiervoor zal binnenkort een nieuw projectvoorstel worden ingediend.

7 Algemene discussie

7.1 Technische resultaten

In de loop van dit project is het concept van temperatuurintegratie op basis van de balans tussen groei- en ontwikkelingsprocessen uitgewerkt en getoetst. Duidelijk inzicht is uiteindelijk verkregen in de betrokken gewaskundige mechanismen en hun samenhang, waardoor het concept naar verwachting eenvoudig vertaalbaar zal zijn naar andere gewassen. De keuze van paprika als proefgewas heeft voor de nodige complicaties gezorgd omdat bij dit gewas de vruchtzetting en de uitgroeiduur uitgesproken dynamische processen zijn, die sterk op de factor temperatuur reageren. Juist de noodzaak tot het doorgronden van deze complexe dynamiek heeft er echter toe geleid dat nu een resultaat is verkregen waarvan mag worden verwacht dat het zonder moeilijkheden naar andere gewassen is te vertalen.

Noodgedwongen is aanvankelijk gekozen voor de ontwikkeling van een sterk vereenvoudigd, generiek model, waarbij sterk de nadruk lag op de interacties tussen groei en ontwikkeling op hoofdlijnen, ten koste van enige precisie. De resultaten met dit RRT-model laten zien dat het mogelijk is om, met name in combinatie met een optimaliserend stookprogramma zoals de Econaut CTI, mogelijk is om een zeer aanzienlijke extra energiewinst te behalen, bij gelijkblijvende (of zelfs iets betere) productie en kwaliteit. De resultaten van de tweede toetsing in Horst in 2002 vormen daarbij de belangrijkste *proof of principle*; ze laten zien dat de benadering in principe werkt. Ook is van belang dat een betrouwbare methode is gevonden om op eenvoudige wijze een stuurmodel zoals RRT te koppelen aan een bestaande optimaliserende regelaar. Echter om de claim waar te kunnen maken dat toepassing van temperatuurintegratie hand in hand kan gaan met een betere en meer doelgerichte beheersing van het teeltproces, bleek de RRT-benadering te weinig genuanceerd.

Om de gedetailleerde voorspellingen te kunnen doen die van direct nut zijn voor telers bij het beheersen van het teeltproces bleek een gedetailleerd dynamisch gewasmodel nodig te zijn. Binnen het kader van dit project is het gelukt om voldoende informatie te verzamelen op grond waarvan een dergelijk gedetailleerd dynamisch model kon worden geconstrueerd. Het prototype model dat in het kader van dit project is gebouwd was aanvankelijk te complex om van praktisch nut te zijn voor het aansturen van een klimaatregeling. Wel is de opgedane ervaring van cruciaal belang gebleken voor de latere ontwikkeling van de Pepsim modellen, die aanzienlijk eenvoudiger van opzet zijn maar wel de essenties van de dynamiek van de zettings/oogstcyclus van de paprikaplant in zich hebben. Met deze modellen zal het waarschijnlijk wel mogelijk zijn om de gebruiker van betrouwbare detailinformatie te voorzien die nodig is voor het sturen van het productieproces. Tijdens proeven in samenwerking met het internetbedrijf LetsGrow.com zal in het vervolgproject 'oogstvoorspeller paprika' in de loop van het jaar 2003 de werking van deze modellen worden getoetst op praktijkbedrijven. Bij gebleken succes vormt dit de basis voor een gedetailleerde advisering van telers m.b.t. de ligging van de grenswaarden voor temperatuurintegratie. Een nieuw projectvoorstel zal worden geformuleerd om temperatuurintegratie te koppelen aan de oogstvoorspeller.

De stabiliteit van de ontwikkelde modellen moet ook op de langere termijn voldoende groot zijn. In het geval van het in dit project getoetste RRT-model is dit gerealiseerd door een overzichtsscherm aan het stuurmodel toe te voegen waarop de gebruiker op elk gewenst moment kon zien waar het model mee bezig was. Ook zijn procedures ontwikkeld om de streefwaarde voor de plantbelasting van het model regelmatig te vergelijken met de resultaten van gewasregistraties, en eventueel aan te passen wanneer de streefwaarde een onrealistische waarde aan zou nemen. Bij het ontwikkelen van de oogstprognose door tomaat door het bedrijf LestGrow.com is ook veel ervaring opgedaan in het verwerken van informatie uit gewasregistraties om de modelmatige voorspellingen te stabiliseren. Van deze ervaring zal uiteraard ook gebruik worden gemaakt bij het ontwikkelen van de oogstprognose voor paprika op basis van het model PepSim.

De in het kader van dit project ontwikkelde modellen zijn open en modulair geprogrammeerd in Matlab 5.2 en zijn goed gedocumenteerd. Dit was niet alleen noodzakelijk om de getoetste besturingssoftware te kunnen onderhouden en in de loop van het project verder te kunnen ontwikkelen, ook de geleidelijke intensivering van de samenwerking met professionele programmeurs in de loop van het project betekende dat hoge eisen werden gesteld aan structuur en documentatie van de aangeleverde modellen.

In de loop van het project zijn in LTO-verband voor tuinders verscheidene presentaties gegeven van de projectresultaten en de onderliggende principes. In samenwerking met het bedrijf Xpertise is een serie lezingen gegeven, waarbij een significant deel van de Nederlandse tuinbouwvoorlichters is bereikt. De reacties waren over het algemeen positief en het onderwerp leidde vaak tot levendige discussies. De laatste tijd is in contacten met paprikatelers regelmatig gebleken dat het principe van het verband tussen de grenswaarden voor temperatuurintegratie en het handhaven van de plantbalans geleidelijk ingang vindt in de praktijk. Het feit dat het model PepSim, een directe spin-off is van dit project, dit jaar wordt ingebouwd in LetsGrow.com laat zien dat automatiseerders in de tuinbouw de resultaten van dit project serieus genoeg nemen om er zelf in te gaan investeren.

Energiebesparing door toepassing van temperatuurintegratie mag uiteraard niet leiden tot (een verhoogd risico op) opbrengstvermindering of kwaliteitsverlies. De huidige resultaten laten zien dat het productieniveau van alle experimentele behandelingen uiteindelijk minimaal op hetzelfde niveau uitkwam als in een conventioneel geregelde kas, zonder dat vruchtafwijkingen als zwel- en kopscheuren, knopen of neusrot significant meer voorkwamen in de experimenteel geregelde afdelingen. Een bezoekende groep vooraanstaande paprikatelers gaf, in een stadium dat de experimentele behandelingen al gedurende 3 maanden waren toegepast, aan de stand van alle gewassen een gunstige beoordeling.

7.2 Energie resultaten

Een belangrijke uitkomst van het project is dat is aangetoond dat het mogelijk is om ruim 25% energiebesparing te realiseren door toepassing van een meer dynamische klimaatregeling, zonder verlies aan productie of kwaliteit. Het te angstvallig vasthouden aan bestaande teeltrecepten, waardoor in een vorig project (Praktijkdemonstratie meerdaagse temperatuurintegratie; van den Berg et al., 2000) de effecten van toepassing van het programma Econaut CTI vrijwel op nul uitkwamen, blijkt dus onnodig te zijn. Het besparend effect van de Econaut zonder de combinatie met het RRT-principe bleek met de gekozen instellingen 8 – 10% te zijn. Het meest kansrijk bleek het combineren van een regeling van het temperatuurniveau op basis van het RRT-principe met een optimaliserend stookprogramma, waarmee de nagestreefde temperatuurniveaus efficiënt konden worden gerealiseerd. In de afdelingen waarin het programma Econaut CTI actief was, is een bescheiden productieverbetering van rond de 5% gerealiseerd. De combinatie van energiebesparing en productieverhoging betekent dat de verbetering van energie-efficiëntie van het teeltproces zelfs nog iets groter was. Energiebesparing door toepassing van temperatuurintegratie betekent een navenante reductie van de CO₂-uitstoot. De energiebesparing wordt voor een deel bereikt door reductie van de ventilatie. Vooral wanneer het bedrijf beschikt over een warmtebuffer is het hierdoor mogelijk om bij zonnig weer een hoger CO₂-niveau in de kas te handhaven dan met een conventionele klimaatregeling mogelijk is. Hierbij komt dat de 5% opbrengstverbetering ook betekent dat er meer CO₂ wordt vastgelegd in het gewas.

Bij het vaststellen van de effecten van een nieuwe techniek op het energieverbruik is naast het besparingspotentieel altijd ook de acceptatie door de doelgroep van belang. Tot nu toe is de acceptatie van het begrip temperatuurintegratie belemmerd geweest door de associatie met risico bij overschrijding van de grenswaarden waarbinnen de toepassing veilig mogelijk is. De resultaten van dit project laten zien dat toepassing van temperatuurintegratie en het in balans houden van het gewas niet strijdig zijn, maar juist in elkaars verlengde liggen. Door de ontwikkeling van de dynamische modellen in het kader van dit project en als voortzetting daarvan is vrij nauwkeurig duidelijk geworden wat het begrip plantbalans precies inhoudt en hoe die balans kan worden beïnvloed. Het binnenkort beschikbaar komen van een oogstprognose voor paprika via LetsGrow.com kan hier een cruciale rol in spelen omdat het programma het mogelijk maakt voor

alle aangesloten telers om kwantitatief inzicht te verkrijgen in effecten van verschillende temperatuurinstellingen op de klimaatcomputer op het te verwachten verloop van de teelt. Met deze beslissingsondersteunende functie kan een eind komen aan de bestaande onzekerheid over het in balans houden van het gewas. Wanneer een tweede versie van het oogstprognosemodel afhankelijk van de weersgesteldheid en de actuele toestand van het gewas directe, kwantitatieve aanbevelingen kan doen over het gebied waarbinnen temperatuurintegratie veilig kan worden toegepast zal het mogelijk worden om het belangrijkste doel van het project te realiseren. Dan zal het toepassen van temperatuurintegratie niet langer een kwestie zijn van het afwegen van een kleine kostenreductie tegen een onbekend risico. De associatie zal dan in de eerste plaats zijn met veiligheid en het beheersen van risico's op basis van een beter inzicht in de basale processen die het succes van de teelt bepalen. Het mooie van beslissingsondersteuning op basis van gewasmodellen via internet is dat complexe teeltkundige kennis op een laagdrempelige manier ontsloten kan worden, zonder dat de gebruikers daarvoor zelf eerst een studie plantenfysiologie of productie-ecologie hoeven te volgen.

Het gewas paprika is momenteel qua omzet en areaal het belangrijkste vruchtgroentegewas in Nederland. Er zijn momenteel nog slechts weinig paprikatelers die temperatuurintegratie toepassen, en de bereikte percentages energiebesparing lijken over het algemeen laag te liggen (van den Berg et al., 2000). Op basis van de resultaten van dit project blijkt het mogelijk om de energiebesparing haast te vertienvoudigen, van enkele procenten naar omstreeks 25%. Wanneer een adequate beslissingsondersteuning beschikbaar zou komen, is het voorstelbaar dat het aantal tuinders dat temperatuurintegratie gaat toepassen kan vertienvoudigen. Paprikatelers kunnen hierdoor een voorbeeldfunctie krijgen voor de rest van de glasgroentensector. Wanneer de in dit project ontwikkelde principes vertaald worden naar de andere grote groentegewassen tomaat en komkommer, dan zou er werkelijk sprake zijn van een doorbraak op het gebied van energiebesparing.

7.3 Noodzakelijk vervolgonderzoek en overige mogelijkheden

Het hier gerapporteerde onderzoek heft de mogelijkheden aangetoond van verdergaande energiebesparing door toepassing van het principe van het klimaatregelen op basis van plantbalans, en inzicht gegeven in de bepalende gewaskundige processen. Dit inzicht is gekwantificeerd en operationeel gemaakt in de vorm van dynamische gewasmodellen, die momenteel worden ingebouwd in een op internettechnologie gebaseerde oogstvoorspeller voor paprika. Een noodzakelijke vervolgstap is het toevoegen van een beslissingsondersteunende functionaliteit m.b.t. het gebied waarin temperatuurintegratie veilig kan worden toegepast, dat wil zeggen zonder dat daardoor de plantbalans verstoord raakt. Deze extra functies kunnen in principe direct worden gebaseerd op de resultaten van dit project; aanvullend fundamenteel onderzoek lijkt hiervoor niet nodig. Uiteraard zal deze uitbreiding van de oogstvoorspeller wel eerst moeten worden getoetst. Vervolgens zal nog het nodige moeten worden geïnvesteerd in de begeleiding van de eerste generatie gebruikers om tot een verantwoorde praktijkimplementatie te kunnen komen.

Bij gebleken succes ligt het voor de hand om de ontwikkelde mogelijkheden te vertalen naar de belangrijkste overige vruchtgroenten tomaat, komkommer en aubergine.

Een interessante extra mogelijkheid is het zoeken naar nieuwe rassen die bij een lager temperatuurniveau nog in balans zullen blijven. De op de resultaten van dit project gebaseerde gewasmodellen PepSim en OscPep lijken samen alle elementen te omvatten op basis waarvan kan worden voorspeld welke eigenschappen een nieuw ras zal moeten hebben om bij een lager temperatuur nog in balans te blijven. Op basis van de kennis vertegenwoordigd in deze modellen kan duidelijk worden gemaakt waarom de plantbalans bij een te lage teelttemperatuur verstoord raakt. De modellen kunnen ook worden gebruikt om op basis van parametertuning te exploreren wat precies de eigenschappen van de cruciale afstemmingsprocessen zijn die zorgen dat de balans bij een lager temperatuurniveau tot stand komt. De huidige rassen zijn geselecteerd om het onder de gangbare teeltomstandigheden goed te doen, maar op basis van modelstudies kan gericht worden vastgesteld welke eigenschappen de bepalende processen moeten hebben om bij een lagere temperatuur evenwicht te bereiken. Zo kunnen de modellen die in – of op

basis van - dit project zijn ontwikkeld richting geven aan het selectieproces en een efficiënt alternatief vormen voor het meer proefondervindelijke rassenonderzoek.

8 Referenties

- Adanson (1750), geciteerd door Wang (1960) – A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology* 41: 785-790.
- Aloni, B., Pressman, E., Karni, L. (1999) - The effect of fruit load, defoliation and night temperature on the the morphology of pepper flowers and on fruit shape. *Ann. Bot.* 83: 529-534.
- Angus, J.F., Mackenzie, D.H., Morton, R. and Schafer, C.A. (1981) – Phasic development in field crops II. Thermal and photoperiodic responses of spring wheat. *Field Crops Research* 4: 269:283
- Bakker, J.C. & van Uffelen, J.A.M. (1988) - The effects of diurnal temperature regimes on growth and yield of glasshouse sweet pepper. *Neth. J. Agric. Sci.* 36: 201-208.
- Bin Liu & Heins, R.D. (1997) - Is plant quality related to the ratio of radiant energy to thermal energy? *Acta Hort.* 435: 171-182.
- Buwalda, F. (1996) - Mogelijkheden voor energiebesparing door temperatuurintegratie bij siergewassen - literatuuroverzicht. PBG rapport 118.
- Buwalda, F., Wertwijn, R. & Eveleens, B. (1996) - Mogelijkheden voor energiebesparing door temperatuurintegratie bij siergewassen - Een inventarisatie bij zes sierteeltgewassen. PBG Rapport 119.
- Buwalda, F. (1997) - Mogelijkheden voor energiebesparing door temperatuurintegratie bij siergewassen - Effecten van lichtniveau, temperatuurniveau en wachttijd op de integratiecapaciteit van Ficus, Kalanchoe, Gerbera en roos. PBG rapport 120.
- Buwalda, F., Eveleens B, Wertwijn R. (2000) - Ornamental crops tolerate large temperature fluctuations: a potential for more efficient greenhouse heating strategies. *Acta Hort.* 515: 141- 149.
- Buwalda, F., Rijdsdijk, A.A., Vogelesang, J.V.M., Hattendorf, A., Batta, L.G.G. (1999) - An energy efficient heating strategy for cut rose production based on crop tolerance to temperature fluctuations.. *Acta Hort.* 507: 117-125.
- Buwalda, F., Rijdsdijk, A.A., Van Leeuwen, G.J.L., Hattendorf, A., Vogelesang, J.V.M. (1999) - Mogelijkheden voor energiebesparing door temperatuurintegratie bij siergewassen. Toetsen van een meerdaags integrerende temperatuurregeling onder realistische teeltomstandigheden. PBG Rapport 176.
- Buwalda, F. (2002) - Grenswaarden voor temperatuurintegratie. PPO intern verslag (concept).
- Challa, H., Heuvelink, E. and van Meeteren, U. (1995) – Crop growth and development. In: *Greenhouse Climate control, an integrated approach* (J.C. Bakker et al., eds). Wageningen Pers, Wageningen, pp. 62-84.
- Gary, C., Jones ,J.W., Tchamitchian, M. (1998) - Crop modelling in horticulture: state of the art. *Sci. Hort.* 74: 3-20.
- Heins, R.D. Liu, B. Runkle, E.S. (2000) - Regulation of crop growth and development based on environmental factors. *Acta Hort.* 515: 15-24.
- Heuvelink, E. (1996) - Dry matter partitioning in tomato: Validation of a dynamic simulation model. *Ann. Bot.* 77: 71-80.

Heuvelink, E. (1996) - Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Proefschrift, Universiteit Wageningen.

Hurd, R.G. & Graves, C.J. (1984) - The influence of different temperature patterns having the same integral on the earliness and yield of tomatoes. *Acta Hort.* 148: 547-554.

Katz, Y.H. (1952) – The relationship between heat unit accumulation and the planting and harvesting of canning peas. *Agron. J.* 44: 74-78.

Koning, A.N.M. de (1990) - Long-term temperature integration of tomato. Growth and development under alternating temperature regimes. *Sci. Hort.* 45: 117-127.

Koning, A.N.M. de (1988) - More efficient use of base load heating with a temperature integrating control programme. Effect on development, growth and production of tomato. *Acta Hort.* 229: 233-237.

Koning, A.N.M. de (1989) - The effect of temperature on fruit growth and fruit load of tomato. *Acta Hort.* 248: 329-336.

Koning, A.N.M. de (1988) - An algorithm for controlling the average 24-hour temperature in glasshouses. *J Hort. Sci.* 63: 473-477.

Koning, A.N.M. de (1992) - Effect of temperature on development rate and length increase of tomato, cucumber and sweet pepper. *Acta Hort.* 305: 51-55.

Koning, A.N.M. de (1994) - Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach. Proefschrift, Universiteit Wageningen.

Liu, B. & Heins, R.D. (1998) - Modeling poinsettia vegetative growth and development: the response to the ratio of radiant to thermal energy. *Acta Hort.* 456: 133-142.

Ludolph, D. & Hendriks, L. (1989) - Dynamische Regelstrategien - Grenzen und Möglichkeiten. *Zierpflanzenbau* 4: 150-154.

Maaswinkel, R., Janse, J. en Elzo Kramer, C. (1991) Temperatuuronderzoek bij Paprika seizoen 1990 – 1991. PTG Intern Verslag 34.

Maaswinkel, R., Janse, J., Elzo Kraemer, C. (1991) - Temperatuuronderzoek bij paprika seizoen 1990-1991. PBG intern verslag 34.

Marcelis, L.F.M. & Koning, A.N.M. de (1995) - Biomass partitioning in plants. In: *Greenhouse climate control - an integrated approach* J.C. Bakker, G.P.A. Bot, H. Challa & N.J. van de Braak Wageningen Pers Wageningen: pp.84-92

Marcelis, L.F.M., (1994) - Fruit growth and dry matter partitioning in cucumber. Proefschrift, Universiteit Wageningen.

Papenhagen, A. (1977) - Wie zweckmäßig ist eine lichtabhängige Temperaturführung bei Zierpflanzen?. *Gb+Gw* 34: 811-813.

Réaumur, R.A.F. de (1735) - geciteerd door Wang (1960) – A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology* 41: 785-790.

Richards, F.J. (1959) - A flexible growth function for empirical use. *J. Exp. Bot.* 10: 290-300.

- Rylski, I. (1984) - Capsicum. In: CRC Handbook of flowering, Boca Raton, Fla., pp. 140-146.
- Rylski, I. (1986) - Pepper (Capsicum). In: CRC Handbook of fruit set and development, S.P. Monelise, ed., CRC Press Boca Raton, Fla., pp 341-354.
- Rijdsdijk, A.A., Vogelesang, J.V.M., Van Leeuwen, G.J.L., Van Noort, F.R., Heij, G., Mulderij, G.E., De Hoog, J., Jasperse, H. (1998) - Temperatuurintegratie op etmaalbasis. PBg rapport 135.
- Slack, G. & Hand, D.W. (1983) - The effect of day and night temperatures on the growth, development and yield of glasshouse cucumbers. J. Hort. Sci. 58: 567-573.
- Steininger, J., Pasian, C.C. and Lieth, J.H. (2002) – Extension of a thermal unit model to represent nonlinearities in temperature response of miniature rose development. J. Am. Soc. Hort. Sci. 127: 349-354.
- Summerfield, R.J. Roberts, E.H. Ellis, R.H. Lawn, R.J. (1991) - Towards the reliable prediction of time to flowering in six annual crops. I. The development of simple models for fluctuating field environments. Experimental Agric. 27: 11-31.
- Van den Berg, G.A., Buwalda, F. Rijpsma, E. (2001) - Praktijkdemonstratie Meerdaagse Temperatuurintegratie. PPO rapport 501.
- Vlugt, J.L.F. van der (1983a) - The effect of temperature changes during the propagation of cucumbers. Meldinger fra Norges landbrukshogskole 62(21): 1-6.
- Vlugt, J.L.F. van der (1983b) - The effect of temperature on formation and abortion of flower buds in gynoecious cucumber plants. Sci. Hort. 20:323-328.
- Wang, J.Y. (1960) - A critique of the heat unit approach to plant response studies. Ecology 41: 785-790.